

**LUIS FELIPE QUINTERO GÓMEZ**

***DISEÑO DE ELEMENTOS PRE-ENSAMBLADOS DE  
RAPIDO ENSAMBLE UTILIZANDO EL ACERO  
COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL.***

Proyecto presentado para la obtención  
del título de Magister en Ingeniería

Área de concentración:

Formación educativa en ingeniería

Asesor:

MSc. Jaime Leonardo Barbosa Pérez

Universidad EAFIT

**Maestría en Ingeniería**

**Universidad EAFIT**

**Medellín – Colombia**

**2015**



## RESUMEN

Durante los últimos 40 años, el uso de elementos prefabricados para la fabricación y soporte de edificaciones ha crecido significativamente debido a su facilidad de transporte, montaje y ahorro de tiempo respecto a un sistema tradicional [1]. Las edificaciones en acero estructural se han desarrollado ampliamente a lo largo del mundo debido a su alta resistencia mecánica, alta ductilidad, homogeneidad, mayor control en los procesos constructivos, pre-montaje, facilidad en el transporte de los elementos y una mayor velocidad en el ensamble [2]. Sin embargo en países como Colombia donde la construcción tradicional sigue dominando el modelo constructivo se han seguido desarrollado nuevas tecnologías para el mejoramiento continuo de los procesos constructivos [1].

Este trabajo muestra el diseño, el análisis y el cálculo de los elementos pre-ensamblados a partir del diseño de un prototipo como propuesta inicial del proyecto. Este trabajo abarca desde la preconcepción de los elementos (utilizando metodologías de diseño), modelado 3D de cada uno de los elementos hasta el análisis y cálculo dinámico y estático de la edificación. Para el desarrollo de cada uno de los elementos se utilizaron diferentes programas CAD para el modelado geométrico; adicional se utilizaron diferentes métodos y herramientas tanto analíticas como computacionales para el cálculo y análisis dinámico del prototipo base.

Para la realización del modelo constructivo se plantea utilizar nuevos materiales para el diseño de los pisos y fachadas, utilizando como resultado una combinación de fibra de vidrio, espuma de poliuretano, neopreno y madera. Este conformado fue sometido a ensayos experimentales para pre-determinar la resistencia y las características propias.

Adicional se realizaron cálculos teóricos y ensayos experimentales para determinar el nivel de absorción acústico y de transferencia de calor del material. Debido a la concepción del diseño de los elementos prefabricados fue necesario realizar diferentes análisis de simulación estructural en elementos finitos para determinar diferentes conexiones de perfiles estructurales en acero.

**Palabras Claves** Construcción Off-Site, módulo, cálculo, prefabricación y componentes.

## ABSTRACT

During the last forty years, the use of prefabricated elements manufacturing and support of buildings have grown significantly due to ease of transportation, assembly and time saving on compared to the traditional system [1]. The structural steel buildings have developed amply around the world due to high mechanical resistance of the Steel, high ductility, homogeneous, it has more control than traditional construction, it has ease of transportation of each elements and it is faster in the assembly than others manufacturing processes [2]. However, there are countries like Colombia where the traditional construction continue dominating the constructive model; in spite of this, they have been further developed new technologies to improve the constructive processes [1].

This work shows the design, analysis and the calculation of the pre-assembly elements since the design of a prototype like an initial proposal of the project. This work compiles since the preconception of the elements, 3D modeling, until the dynamics and statics calculation of the building. For develop of each elements, we used different CAD programs for geometry modeling; in addition, we use different methods and analytic tools for the calculation and dynamics analysis of the prototype base.

For develop of the constructive model, we proposed using new materials for the floors and facade design. We using as a result a combination glass fiber, polyethylene foam, neoprene and wood. This shaped was submitted to experimental testing to pre-determinate the resistance and own characteristics. In addition, we did theoric calculation and experimental testing to determinate the acoustic absorption level and the heat transfer level insulation of the material. Due the conception of the prefabricated elements design,

it was necessary to do different structural simulation analysis (MEF) to determinate different connections of structural steel profiles.

**Palabras Claves** Off-Site Construction, module, calculation, prefabricated and components.

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	17
1.1	OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	17
1.2	DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS DEL PROYECTO	21
1.3	PRODUCCIÓN INTELECTUAL DEL PROYECTO	22
2	MARCO TEÓRICO	23
2.1	LA PREFABRICACIÓN	23
2.2	MODELO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL (REACCIONES)	26
2.2.1	MÉTODO DE KANI	26
2.2.2	MÉTODO MATRICIAL	30
2.2.3	PROGRAMAS COMPUTACIONALES	36
2.3	MODELO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL (ELEMENTOS EN ACERO)	37
3	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO	51
3.1	CONDICIONES DE DISEÑO	51
3.1.1	MATERIALES	53
3.1.2	HERRAMIENTAS TÉCNICAS	53
3.1.3	DISEÑO DE MPOSS	54
3.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE MPOSS	56
3.2.1	MÓDULO DE ENTREPISO	56
3.2.2	COLUMNAS RECEPTORAS	59
3.2.3	MÓDULO DE FACHADA	60
3.2.4	MODO DE ENSAMBLE	61
4	DISEÑO DEL SISTEMA DE PISO	64
4.1	ENSAYOS EXPERIMENTALES	67

4.1.1	DEFINICIÓN DE PRUEBA	67
4.1.2	DESCRIPCIÓN DE PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS VISUALES DEL ELEMENTO	68
4.1.3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	69
4.1.4	RESISTENCIA IMPACTO	70
4.1.5	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	71
4.1.6	RESISTENCIA AL DESGASTE	74
4.1.7	RESISTENCIA AL DESGARRE	75
4.1.8	APRIETE DE PERNOS	76
4.1.9	AGARRE DE TORNILLOS	78
4.1.10	RESISTENCIA AL FUEGO Y TRANSFERENCIA DE CALOR POR LLAMA	79
4.2	CÁLCULO TEÓRICOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO Y TÉRMICO.	81
4.2.1	CÁLCULO DE AISLAMIENTO ACÚSTICO.	81
4.2.2	INTENSIDAD ACÚSTICA O SONORA	87
4.2.3	NIVEL DE INTENSIDAD ACÚSTICA	88
4.2.4	ENERGÍA DE INCIDENCIA, DE REFLEXIÓN Y DE ABSORCIÓN	88
4.2.5	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO	89
4.2.6	CASO DE ESTUDIO	92
4.2.7	CÁLCULO TEÓRICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO	95
4.2.8	CASO TEÓRICO	98
4.2.9	EXPERIMENTACIÓN	103
4.3	CONCLUSIONES PRELIMINARES	111
5	CONEXIONES ESPECIALES	112
5.1	CONEXIÓN DE VIGAS DE ENTREPISOS	112
5.1.1	RESULTADOS PRELIMINARES	117
5.2	ANÁLISIS DE CONEXIÓN COLUMNA RECEPTORA – MÓDULO DE ENTREPISO	121

5.2.1	DISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS	121
5.2.2	ANÁLISIS DINÁMICO	126
6	PROTOTIPO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL	130
6.1	LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA	132
6.2	COMPONENTES ESTRUCTURALES	133
6.3	PERFILES ESTRUCTURALES	135
6.4	MATERIALES	135
6.5	CARGAS	136
6.5.1	CARGAS MUERTAS	136
6.5.2	CARGAS VIVAS	137
6.5.3	EMPOZAMIENTO	138
6.5.4	FUERZA DE VIENTO	138
6.6	ANÁLISIS DINÁMICO	138
6.7	COMBINACIONES DE CARGA	140
6.8	ANÁLISIS DE DERIVAS	143
6.9	ENVOLVENTE DE MOMENTOS	144
6.10	CÁLCULO ESTRUCTURAL	144
6.10.1	CÁLCULO DE VIGAS	144
6.10.2	CORTANTE DE VIGA	150
6.10.3	CÁLCULO DE COLUMNAS	162
6.10.4	CONEXIONES PERNADAS DE LA EDIFICACIÓN.	169
6.10.5	CONEXIONES SOLDADAS DE LA EDIFICACIÓN.	177
6.10.6	DIMENSIONAMIENTO DE PLATINAS DE SOPORTE.	184
6.10.7	DISEÑO DE CONEXIONES PARA PTE CUADRADAS.	187
6.10.8	CÁLCULO DE PLACAS BASE.	190

6.10.9	CONEXIÓN ESPECIAL, CORTE DE VIGA.	197
6.10.10	ARRIOSTRAMIENTO.	200
6.11	RESULTADOS PRELIMINARES	204
7	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	210
7.1	MEJORAS REALIZADAS AL PROTOTIPO	211
8	CONCLUSIONES	214
9	BIBLIOGRAFÍA	217

## Ilustraciones

<i>Ilustración 1: Catálogo de casas prefabricadas Sear Roebuck and Co (1908-1914) (Archives 2012).</i>	23
<i>Ilustración 2: Modelo Maison en Trois Jours por Maison Voisin 1920 (VOISIN 2014)</i>	24
<i>Ilustración 3: Representación de los momentos y cargas actuantes del método de Kani (Autoría propia).</i>	30
<i>Ilustración 4: Viga con grados de libertad y dirección de análisis asignados (Autoría propia).</i>	31
<i>Ilustración 5: Desplazamiento producido por carga axial sobre el elemento (Autoría propia).</i>	32
<i>Ilustración 6: Desplazamiento producido por carga normal sobre el elemento (Autoría propia).</i>	32
<i>Ilustración 7: Giro por flexión producido por la acción de un momento en el nodo (Autoría propia).</i>	33
<i>Ilustración 8: Elemento direccionado en su propio eje (Autoría propia).</i>	34
<i>Ilustración 9: Matriz de rigidez en coordenadas globales (Autoría propia).</i>	35
<i>Ilustración 10: Diagrama de diseño evaluativo MPOSS (Autoría propia).</i>	52
<i>Ilustración 11: Diagrama de conformación de partes, sub-ensamble y Ensamble de MPOSS (Autoría propia).</i>	55
<i>Ilustración 12: Entrepiso metálico (Autoría propia).</i>	57
<i>Ilustración 13: Sistema prefabricado modular Off-Site (Autoría propia).</i>	58
<i>Ilustración 14: Vista posterior del módulo de entrepiso (Autoría propia).</i>	58
<i>Ilustración 15: Columnas Receptoras (Autoría propia).</i>	60
<i>Ilustración 16: Ensamble de módulo de entrepiso y columnas receptoras (Autoría propia).</i>	62
<i>Ilustración 17: Unión perimetral de dos módulos (Autoría propia).</i>	62
<i>Ilustración 18: Modelo simple reticular (Autoría propia).</i>	65
<i>Ilustración 19: Placas superficiales de piso suspendido (Autoría propia).</i>	66
<i>Ilustración 20: Ensamble placas superficiales con placa base (Autoría propia).</i>	66
<i>Ilustración 21: Ensamble de placas superficiales con placa base (Autoría propia).</i>	67
<i>Ilustración 22: Sanduche de fibra de vidrio (Autoría propia).</i>	68
<i>Ilustración 23: Muestra y ensayo de resistencia a flexión (Autoría propia).</i>	69
<i>Ilustración 24: Foto resistencia a la flexión de elemento (Autoría propia).</i>	70
<i>Ilustración 25: Prueba de Impacto (Autoría propia).</i>	71
<i>Ilustración 26: Ensayo a compresión (Autoría propia).</i>	72
<i>Ilustración 27: Resultado del ensayo (Autoría propia).</i>	73
<i>Ilustración 28: Disminución de distancia de Omega (Autoría propia).</i>	73
<i>Ilustración 29: Prueba de fricción. (Autoría propia).</i>	74
<i>Ilustración 30: Resultado de desgaste (Autoría propia).</i>	75

<i>Ilustración 31: Resistencia al desgarre de una sección de piso (Autoría propia).</i>	75
<i>Ilustración 32: Resultados de pruebas a desgarre por tensión (Autoría propia).</i>	76
<i>Ilustración 33: Apriete de pernos (Autoría propia).</i>	77
<i>Ilustración 34: Deformación por apriete de perno (Autoría propia).</i>	77
<i>Ilustración 35: Prueba agarre de tornillo (Autoría propia).</i>	78
<i>Ilustración 36: Ensayo de agarre de tornillos (Autoría propia).</i>	79
<i>Ilustración 37: Prueba resistencia a llama (Autoría propia).</i>	80
<i>Ilustración 38: Diagrama de una onda sinusoidal (Autoría propia).</i>	82
<i>Ilustración 39: Diagrama de energía sonora incidente, reflejada, absorbida y transmitida.</i>	89
<i>Ilustración 40: Diagrama de capas del piso (Autoría propia).</i>	92
<i>Ilustración 41: A la izquierda flujo de calor y a la derecha flujo de electricidad.</i>	97
<i>Ilustración 42: Conexión de resistencias térmicas (Autoría propia).</i>	98
<i>Ilustración 43 - Configuración piso modular compuesto (Autoría propia).</i>	98
<i>Ilustración 44 – Diagrama de resistencias térmicas (Autoría propia).</i>	100
<i>Ilustración 45 – Diagrama simplificado de resistencias térmicas (Autoría propia).</i>	100
<i>Ilustración 46 – Ubicación de las medidas de temperatura hechas sobre las placas (Autoría propia).</i>	103
<i>Ilustración 47 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia).</i>	104
<i>Ilustración 48 - Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).</i>	105
<i>Ilustración 49 - Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad con madera (Autoría propia).</i>	105
<i>Ilustración 50 – Gráfica de temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia).</i>	107
<i>Ilustración 51 - Gráfica de temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).</i>	108
<i>Ilustración 52 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia).</i>	109
<i>Ilustración 53 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).</i>	110

<i>Ilustración 54 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de baja densidad con madera (Autoría propia).</i>	110
<i>Ilustración 55: Perfiles en H y C (Autoría propia).</i>	112
<i>Ilustración 56: Alternativas de conexión estructural de los perfiles en C (Autoría propia).</i>	113
<i>Ilustración 57: Desplazamiento propuesta 1 (Autoría propia).</i>	116
<i>Ilustración 58: Desplazamiento propuesta 2 (Autoría propia).</i>	116
<i>Ilustración 59: Desplazamiento propuesta 3 (Autoría propia).</i>	117
<i>Ilustración 60: Desplazamientos resultantes en el eje Z (Autoría propia).</i>	117
<i>Ilustración 61: Desplazamiento resultante en el eje Y (Autoría propia).</i>	118
<i>Ilustración 62: Desplazamiento resultante en el eje X (Autoría propia).</i>	118
<i>Ilustración 63: Agujeros sobre el mismo plano. Propuesta 3 (Autoría propia).</i>	119
<i>Ilustración 64: Agujeros en planos separados. Propuesta 3 (Autoría propia).</i>	119
<i>Ilustración 65: Distancias de perforaciones y platinas entre el nervio en H (Autoría propia).</i>	120
<i>Ilustración 66: Deformación aumentada de los perfiles en C (Autoría propia).</i>	121
<i>Ilustración 67: Representación de la distribución de la carga sobre la viga (Autoría propia).</i>	122
<i>Ilustración 68: Pórtico estructural (Autoría propia).</i>	124
<i>Ilustración 69: Curva de momentos en viga bajo efectos de cargas vivas y muertas (Autoría propia).</i>	125
<i>Ilustración 70: A) Modelado pórticos segmento viga completa (Autoría propia).</i>	127
<i>Ilustración 71: Piso 1: área de oficinas y zonas de estudio (Autoría propia).</i>	131
<i>Ilustración 72: Piso 2: área de monitorias y asesorías (Autoría propia).</i>	131
<i>Ilustración 73: Piso 3: área de estudio y esparcimiento (Autoría propia).</i>	132
<i>Ilustración 74: Modelado de prototipo (Autoría propia).</i>	134
<i>Ilustración 75: Curva de aceleración de la estructura para derivas y para diseño estructural (Autoría propia).</i>	139
<i>Ilustración 76: Modelado en programa de análisis estructural (Autoría propia)</i>	140
<i>Ilustración 77: Diagrama para el cálculo de vigas (Autoría propia).</i>	145
<i>Ilustración 78: Procedimiento cálculo columnas (Autoría propia).</i>	162
<i>Ilustración 79: Diagrama cálculo de pernos .</i>	170
<i>Ilustración 80: Cálculo de columnas (Autoría propia).</i>	204
<i>Ilustración 81: Cálculo de vigas (Autoría propia).</i>	205
<i>Ilustración 82: Conexiones especiales para vigas y nervios (Autoría propia).</i>	206
<i>Ilustración 83: Cálculo de placa base (Autoría propia).</i>	207

<i>Ilustración 84: Cálculo de pernos.</i>	208
<i>Ilustración 85: Cálculo de soldadura (Autoría propia).</i>	208
<i>Ilustración 86: Prototipo digitalizado.</i>	212
<i>Ilustración 87: Terraza de prototipo.</i>	212

## Tablas

<i>Tabla 1: Ventajas condensadas de los sistemas OSC.</i>	19
<i>Tabla 2: Desventajas condensadas de sistemas OSC.</i>	20
<i>Tabla 3: Variables cálculo de vigas</i>	40
<i>Tabla 4: Longitudes efectivas para columnas</i>	45
<i>Tabla 5: Variables cálculo columnas</i>	48
<i>Tabla 6: Dimensiones y propiedades de probetas</i>	68
<i>Tabla 7: Valores de niveles de presión acústica representados en nivel acústico.</i>	87
<i>Tabla 8: propiedades para el cálculo de la reflexión</i>	93
<i>Tabla 9: Tabla propiedades para el cálculo de la absorción.</i>	94
<i>Tabla 10: Propiedades térmicas de los materiales usados.</i>	99
<i>Tabla 11: Resistencia térmica de los materiales usados.</i>	99
<i>Tabla 12: Características térmicas del entorno.</i>	99
<i>Tabla 13: Tabla con las temperaturas obtenidas en los cinco puntos de la superficie expuesta a radiación de las placas de espuma de alta densidad, baja densidad y baja densidad con madera.</i>	104
<i>Tabla 14: Tabla con las temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación para las placas de espuma de alta y baja densidad.</i>	107
<i>Tabla 15: Tabla con las temperaturas obtenidas en los cinco puntos de la superficie expuesta a la sombra de las placas de espuma de alta densidad, baja densidad y baja densidad con madera.</i>	109
<i>Tabla 16: Definición condiciones de uso.</i>	124
<i>Tabla 17: Cargas vivas y muertas simplificadas.</i>	125
<i>Tabla 18: Restricciones de nodos.</i>	127
<i>Tabla 19: Cargas vivas para las distintas áreas.</i>	137
<i>Tabla 20: Combinaciones de cargas.</i>	141
<i>Tabla 21: Propiedades básicas de perfiles.</i>	145
<i>Tabla 22: Frecuencias generadas al caminar.</i>	160
<i>Tabla 23: Armónicos de vibración.</i>	160
<i>Tabla 24: Propiedades básicas de columnas.</i>	163



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Colombia se encuentra en un proceso de incorporación global, en este proceso se ha logrado como primera iniciativa, tratados de libre comercio con diferentes países como Estados Unidos, Canadá, Corea del Sur, Chile, países miembros de la comunidad andina (CAN) y países del MERCOSUR. Uno de los objetivos es el intercambio y adquisición de nuevas tecnologías para el desarrollo industrial y cultural del país [3]; adicional a esto la RAND (Research and Development) proyectó 16 usos claves para la tecnología en el 2020, uno de estos, es el desarrollo de tecnologías para una producción limpia en la industria y el desarrollo de viviendas económicas y sostenibles [4]; sin embargo el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito constructivo debe estar estrechamente asociado con el desarrollo de nuevas metodologías y métodos, materiales y sistemas constructivos [2], que no solo permitan la sostenibilidad del mismo, si no también permitan disminuir la accidentalidad, el tiempo de construcción y el desperdicio en los vertederos, al reutilizar y reciclar los componentes constructivos, con la posibilidad de tener una actividad de la construcción más técnica, ágil y especializada [5]–[7].

Tanto en Colombia como en Latinoamérica, la construcción es una actividad limitada debido a una serie de factores como: condiciones del clima [1] , mano de obra no calificada, retrasos en el abastecimiento del material, limitaciones de espacio, alto riesgo de accidentalidad del personal y una carencia metodológica en la construcción, lo cual influye directamente con el control del personal, la calidad de los acabados y la planeación de las actividades, que repercute en la valoración presupuestal y en el cumplimiento del cronograma [8].

La situación actual en otros países, respecto al método de construcción tradicional<sup>1</sup> no es muy diferente. UK registró 2800 trabajadores accidentados fatalmente en los últimos 25 años y 56000 trabajadores accidentados entre el 2004 y 2005 [2]. Los sistemas tradicionales constructivos, en la mayoría de los casos, no poseen la estructura, ni el diseño para ser luego reutilizados, desmontados o reciclados; así mismo el desperdicio generado debido a re-procesos, remodelaciones y procesos de fabricación aportan al incremento del desperdicio en los vertederos [5], [6].

En los últimos años el desperdicio generado por la industria de la construcción ha alcanzado niveles altos; se ha generado alrededor del 40% del desperdicio de los vertederos, haciéndose acreedor de uno de los principales factores del impacto ambiental [5]. En algunos países se presentan niveles de desperdicio de construcción elevados como por ejemplo: UK (50%), USA (29%), Australia (25%); Hong Kong (25% en el 2012) [9]; además la alta dificultad de recolección y separación de componentes elevan los costos, convirtiendo la actividad en ocasiones no rentable [5]. A pesar de promover políticas y facilidades para la reutilización y reciclaje de algunos componentes, esta ha sido limitada por la dificultad de extraer y recuperar los distintos elementos que hacen parte de un componente estructural, en adición a la limitación del espacio, supervisores y trabajadores capacitados [5], [6].

El ingreso de los elementos prefabricados (Off-Site Construction, OSC), le da a la industria de la construcción, una forma de minimizar y controlar el desperdicio (84%) y la accidentalidad (35%), al tecnificar la fabricación de elementos estructurales y no estructurales, lo que conlleva una aceleración de los procesos constructivos al dividir las tareas grandes en actividades pequeñas manipulables. Esto anterior permite mejorar la

---

<sup>1</sup> Se define la construcción tradicional como el proceso secuencial de actividades para edificar. Estas actividades son realizadas son manipuladas y realizadas en el sitio de construcción.

calidad, el rendimiento y disminuir los tiempos en la construcción (Aproximadamente 20%) [1], [10], [11].

Por lo tanto, el objetivo de incorporar los OSC como estrategia fundamental del proyecto que poseen ventajas (ver Tabla 1) que pueden llegar a permitir una evolución en la industria de la construcción.

*Tabla 1: Ventajas condensadas de los sistemas OSC.*

VENTAJAS	AUTORES					
	R. Mark	Lara Jaillon	Peter F. Court	Neville Boyd	Vivian W. T.	Nick Blismas
Reducción de tiempo de construcción	X	X	X	X	X	X
Mejor calidad y precisión	X	X	X	X	X	X
Reducción de la accidentalidad y mejoramiento de la salud en los trabajadores	X	X	X	X		X
Mejor control de actividades		X		X	X	X
Disminución de ruido y interrupción	X	X		X	X	
Desmontables o reutilizables		X				
Menor personal On-site				X		X
Disminución del desperdicio	X	X		X	X	X

A pesar de las ventajas que poseen estos sistemas, los OSC poseen limitantes que no permiten adaptarse por completo en una sociedad acostumbrada o culturizada a un sistema constructivo tradicional [1]; algunas de estas limitantes son debidas a que los sistemas prefabricados son considerados rígidos arquitectónicamente dando como resultado una monotonía de diseño; además, algunos sistemas OSC no permiten reformas en el diseño, por lo tanto se vuelven resistentes a los cambios estructurales [1], [5]; así mismo se requieren de sistemas y concepciones de diseño que permitan la

facilidad de transporte, almacenamiento, utilización, mejorando los métodos de conexiones, disminuyendo los tiempo de fabricación y ensamble sin limitar el diseño [10] (ver Tabla 2).

Tabla 2: Desventajas condensadas de sistemas OSC.

DESVENTAJAS	AUTORES				
	R. Mark	Lara Jaillon	Neville Boyd	Vivian W. T.	Nick Blismas
Monotonía arquitectónica	X	X	X	X	
No hay metodología apropiadas			X	X	X
Resistencia a los cambios de diseño		X	X	X	
Alto costo inicial	X	X	X	X	
Limitación de espacio de almacenamiento		X		X	
Problemas de uniones				X	
Falta de experiencia de trabajadores			X	X	
Transporte	X		X		

El objetivo de este trabajo es diseñar y calcular el nuevo modelo o Sistemas Off-Site Pre-ensamblados Modulares (MPOSS<sup>2</sup>); los cuales pretenden enfocarse en la portabilidad, disminución de componentes en zona, disminución en el peso de la edificación y buena resistencia mecánica, utilizando metodologías base como Design for Assembly, Green Buildings y Lean Construction [7], [12]. Adicional se plantea analizar el

---

<sup>2</sup> Simbología propia de los autores para explicar el concepto de sistemas prefabricados superficiales (volumétricos de pequeño espesor) fabricados fuera del área de construcción, para luego ser transportados y ensamblados en la zona de construcción.

comportamiento de algunas conexiones especiales estructurales y un nuevo sistema de piso que fueron diseñadas.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS DEL PROYECTO**

El capítulo 1, expone la motivación y los objetivos del trabajo.

El capítulo 2, muestra el marco teórico en el cual se basa el proyecto. Primero se hace una descripción del proceso de prefabricación a lo largo de la historia. Se presenta la teoría de las diferentes metodologías y ecuaciones que han sido utilizadas para el cálculo de edificaciones.

El capítulo 3, especifica el modelo, materiales y metodologías utilizadas para el diseño de cada uno de los componentes principales. Se hace énfasis en las características geométricas principales de cada uno de los componentes y en el modo de ensamble.

El capítulo 4, define las características de diseño del sistema de piso, los diferentes modelos y formas que fueron realizadas; adicional se muestran algunos ensayos experimentales para determinar algunas de las propiedades y criterios para la validación y el diseño de los pisos.

El capítulo 5, muestra algunas de las conexiones especiales planteadas, evaluadas bajo un estudio de elementos finitos y un análisis de simulación estático y dinámico, con el fin de comparar los resultados con algunas conexiones tradicionales.

El capítulo 6, plantea el diseño de un prototipo donde utiliza el modelo constructivo como base estructural. Muestra el procedimiento de cálculo utilizado, teniendo en cuenta la norma Colombiana de Sismo-Resistencia NSR-10.

El capítulo 7, muestra los resultados principales de la investigación y las mejoras que se han realizado hasta ahora.

El capítulo 8, se plantean las conclusiones finales, sugerencias y la bibliografía como soporte técnico del trabajo.

### **1.3 PRODUCCIÓN INTELECTUAL DEL PROYECTO**

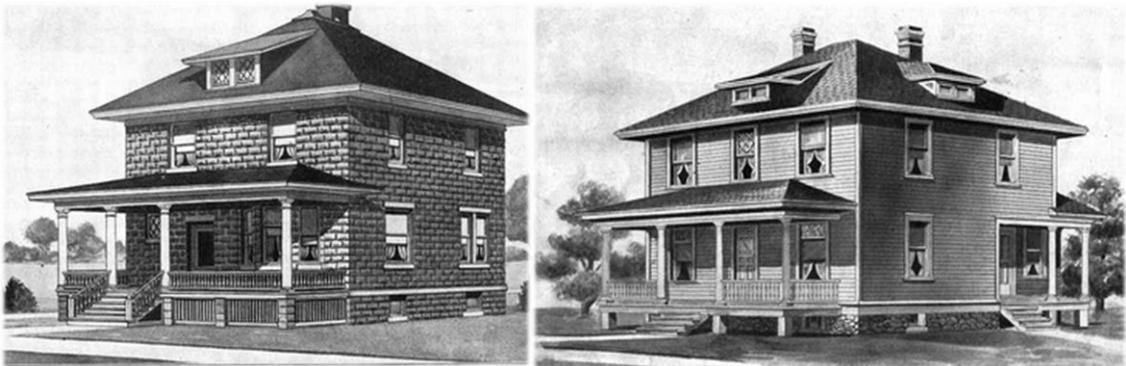
El desarrollo del modelo de construcción permitió generar 10 alternativas de diseño, el cual busca fomentar la aceptación de un nuevo modelo constructivo, liviano, versátil y de rápida construcción. Durante el proceso de desarrollo la Universidad y una firma de abogados determinaron una alta viabilidad para patentar el desarrollo.

En febrero de 2015 se presenta la radicación de la patente como “Sistema Constructivo Modular Estructural” en la ciudad de Medellín.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 LA PREFABRICACIÓN

El diseño de estructuras modulares prefabricadas se remonta a partir del siglo XIX con la aparición de las primeras estructuras fabricadas en madera como la Manning Portable Colonial Cottage en 1830 en Inglaterra; La Gold Rush en 1848, la cual fue adquirida para suplir la creciente demanda de refugios para los trabajadores en California [13]. Al inicio del siglo XX, ES PUBLICADO unos de los primeros catálogos comerciales de casas prefabricadas por Sear Roebuck and Co. (Ilustración 1) en 1908 en USA [14]; Otro ejemplo de prefabricación se contempla en el modelo Maison en Trois Jours por Maison Voisin (Ilustración 2) en 1920, la cual era transportada y construida aproximadamente en 3 horas [13], [15].



*Ilustración 1: Catálogo de casas prefabricadas Sear Roebuck and Co (1908-1914) (Archives 2012).*



*Ilustración 2: Modelo Maison en Trois Jours por Maison Voisin 1920 (VOISIN 2014)*

Se realizaron diferentes ensayos de prototipos sobre el desarrollo de casas prefabricadas en el siglo XX, por ejemplo el modelo Edison o el modelo Lustron las cuales utilizaron diferentes metodologías, conceptos y diseños para la fabricación, el transporte y ensamble de estas [13].

Alrededor de los años 50's, luego de la segunda guerra mundial, los componentes y los sistemas prefabricados constructivos (OSC<sup>3</sup>) como los elementos principales de carga (vigas, columnas, losas), fachadas, escaleras y unidades sanitarias, fueron impulsados con el apoyo del gobierno para suplir la demanda de viviendas al oriente y occidente de Europa entre 1950 y 1970 [1], [10]; Luego de los 70's, los elementos prefabricados OSC fueron implementados para la realización de casas sociales en Hong Kong y Singapur después del alto requerimiento poblacional [1]. En la mitad de los 80's la incorporación de los sistemas modulares volumétricos estándar, fusionado con la prefabricación de componentes es introducido para la fabricación de casas sociales [10]; en consecuencia, la adopción de los sistemas prefabricados llega a un nivel donde en 1996 se estipula el

---

<sup>4</sup> Off-Site Construction (OSC): se refiere a la actividad de fabricación de elementos estructurales por fuera del área de ensamble final.

mayor nivel de prefabricación (hasta esa fecha) a nivel global el cual fue situado en Dinamarca (43%), Holanda (40%), Suiza y Alemania (31%) [10]. En el 2004 UK Housing Corporation requirió al menos que el 25% de las nuevas casas sociales fueran construidas utilizando métodos modernos, lo que impulso significativamente el uso de OSC [1].

La prefabricación es el proceso de manufactura, donde diferentes materiales que envuelven diseño y tecnología, son incorporados para conformar un componente. La prefabricación es una actual inclinación de la industria de la construcción al desplazar la fabricación de componentes estructurales a lugares más aptos, seguros y controlados [6], [10]. De acuerdo a la investigación realizada, existen diferentes tipos de estructuras OSC:

- Hybrid System: Consiste en la fabricación de todos los componentes estructurales y no estructurales en fábrica para luego ser transportados.
- Panelized System: Se refiere a los componentes que normalmente son prefabricados en fábricas independientes para luego ser ensambladas; componentes como puertas, ventanas y sistemas de insolación.
- Off-Site preassembly: Es la actividad donde se fusionan los materiales, componentes y elementos prefabricados para luego ser transportados al sitio de construcción; por lo general suelen ser piezas pequeñas como columnas, vigas, pisos, muros falsos o tubos.
- Modular Building: Se refieren a sistemas volumétricos tipo Bloque desarrollados en fabrica, los cuales tienen incorporado todas las redes de servicio pre-ensambladas para luego ser transportados y ensamblados [1].

Cada uno de estos sistemas ha sido utilizado en la construcción de edificaciones con el objetivo de sub dividir actividades para acelerar los procesos de fabricación.

## 2.2 MODELO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL (REACCIONES)

### 2.2.1 MÉTODO DE KANI

Existen diferentes modelos para determinar las cargas y las reacciones internas de una edificación. Para el desarrollo y diseño del modelo de prefabricación, se contemplaron y analizaron diferentes tipos de programas de modelado para la obtención de las reacciones internas una estructura.

El procedimiento de análisis de pórticos por medio del método de Kani consiste en analizar cada elemento de una estructura estudiando cada uno de los momentos externos e internos generados debido a la configuración, tipo de soporte y libertad del sistema. Las ecuaciones presentes a continuación fueron obtenida de diferentes autores [16], [17].

A continuación se especifica los pasos para en análisis por el método Kani:

#### 2.2.1.1 *Cálculo de Momentos de empotramiento:*

Se calcula todos los momentos originados por las fuerzas externas en cada uno de los nodos que estén influenciados por estas cargas. Tener en cuenta que en la convención de signos se considera Positivo(+) los momentos que generan giros en sentido contrario a las manecillas del reloj; y Negativo(-) los momentos que generan giros del elemento en sentido a las manecillas del reloj.

$$M_{ik} = M_{carga} \mp M_{sentamiento} \mp M_{cedencia empotramiento} \mp M_{puntual}$$

$$M_{carga} = \frac{WL^2}{12} \text{Empotrado}$$

$$\frac{WL^2}{8} \text{Articulado}$$

$$M_{empe} = \pm 4EI\phi/L \text{ ik}$$

$$\pm 2EI\phi/L \text{ ki}$$

$$M_{asen} = -6EI\Delta/L$$

$$M_{puntual} = \pm P/A$$

### 2.2.1.2 **Cálculo de los momentos de sujeción:**

Se realiza una suma general en cada uno de los nodos de todos los momentos de empotramientos relacionados con el nodo de análisis. Es importante conservar los signos obtenidos en los de empotramiento.

$$\overline{M_{ik}} = \sum M^{oik}$$

### 2.2.1.3 **Cálculo de Factores de Giro:**

Los factores representa la relación de la rigidez relativa del elemento con respecto a las rigideces relativas de los elementos adyacentes. Tener en cuenta que en sujeciones articulados  $k' = k \cdot 3/4$ .

$$U_{ik} = -K_{ik} / (K_{ik} + K_{ki})$$

### 2.2.1.4 **Factores de Corrimiento:**

Se define como la relación entre la rigidez de una columna y la sumatoria de las rigideces de las columnas existentes en el piso.

$$\& = \frac{3K_{ij}}{2 \sum K_{ij}} \text{ Empotrado}$$

$$\& = \frac{3K_{ij}}{\sum K_{ij}} \text{ Articulado}$$

### 2.2.1.5 Momentos de Piso:

Consiste en analizar las cargas presentes que hay en cada uno de los pisos y conseguir las cortantes resultantes Q y Mr.

$$Mr = Qr \times Hr/3$$

### 2.2.1.6 Cálculo de Iteraciones:

Se realiza el proceso de realizar iteraciones (Aprox 4) con el fin de generar convergencia en los resultados obtenidos.

$$M'_{ik} = -U_{ik} \left( \overline{M}_{ik} + \sum M'_{Ki} + \sum M''_{Ki} \right) \text{Ecuación de Giro}$$

$$M''_{ik} = \&_{ik} \left( Mr + \sum (M'_{ki} + M'_{ik}) \right) \text{Ecuación de Despl Empotrado}$$

$$M''_{ik} = \&_{ik} \left( Mr + \sum 2/3(M'_{ki} + M'_{ik}) \right) \text{Ecuación de Despl Articulado}$$

### 2.2.1.7 Cálculo de Momentos finales:

Con base a los resultados obtenidos en la sección anterior se procede sumar y obtener los momentos finales.

$$M_{final} = M^o_{ik} + 2M'_{ik} + M'_{ki} + M''_{ik} \text{ Columnas}$$

$$M_{final} = M^o_{ik} + 2M'_{ik} + M'_{ki} \text{ Vigas}$$

### 2.2.1.8 Cálculo de Deriva:

Se define como el desplazamiento lateral originado principalmente por las fuerzas laterales. Esta se define luego de calcular los momentos y fuerzas cortantes.

$$\Delta = L^2 \times \frac{M''_{ik}}{6EI} \text{ Arituculado}$$

$$\Delta = L^2 \times \frac{M''_{ik}}{3EI} \text{ Empotrado}$$

### 2.2.1.9 Cálculo de fuerzas Cortantes y axiales:

Se realiza la separación e individualización de elementos de la edificación con el fin de obtener las fuerzas cortantes y axiales.

$$Q_{ik} = -(M_{ik} + M_{ik})/h_{ik} \text{ Cortantes Columnas}$$

$$Q_{v_{ik}} = \sum Ma = \frac{(M_{FinalIzq} \pm M_{FinalDer} \pm M_{cargas})}{D} \text{ Cortantes Vigas}$$

$$A_{ik} = -Q_{v_{ik}} \text{ Axiales Columnas}$$

$$A_{v_{ik}} = -Q_{ik} - Q_{ki} \text{ Axiales Vigas}$$

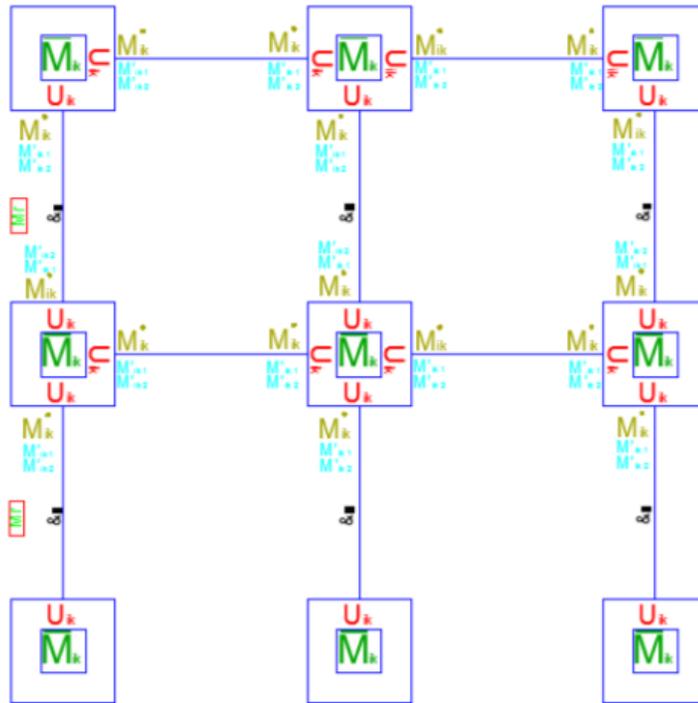


Ilustración 3: Representación de los momentos y cargas actuantes del método de Kani (Autoría propia).

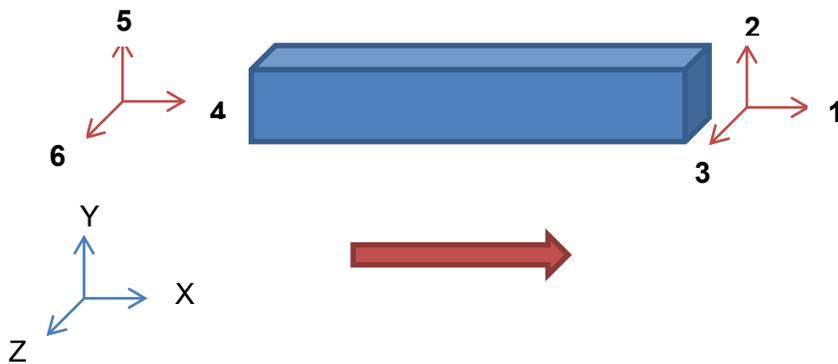
## 2.2.2 MÉTODO MATRICIAL

Se evaluaron diferentes métodos de cálculo como el método matricial, hoy en día utilizado para determinar las reacciones internas de una edificación. El método de análisis matricial parte del análisis de las deformaciones y de las propiedades geométricas y elásticas de cada uno de los elementos de una estructura [18], [19]. Definimos el método matricial de la siguiente manera:

### 2.2.2.1 Matriz de Rigidez [K]:

Estas propiedades están determinadas por las reacciones de un elemento prismático o viga en cada grado de libertad ante un desplazamiento  $u_i$  en uno de sus nodos.

Para efectos de la construcción de la matriz de rigidez, se hace necesario establecer ciertas convenciones: el elemento será evaluado desde un nodo inicial hacia un nodo final elegidos arbitrariamente por el usuario en los extremos del elemento (Ilustración 4), además la asignación de los grados de libertad en cada nodo se hará de la siguiente manera para pórticos planos: cada nodo tendrá tres grados de libertad, el primero será el del eje axial del elemento, el segundo perpendicular al primero en el plano, y el tercero perpendicular a los dos anteriores que representara el giro en el eje Z.



*Ilustración 4: Viga con grados de libertad y dirección de análisis asignados (Autoría propia).*

De esta manera, el nodo inicial de la figura estará compuesto por los grados de libertad 4, 5 y 6, y el nodo final por los grados de libertad 1, 2 y 3.

En el caso de estudio del pórtico plano, solo se consideran los efectos causados por las fuerzas en el plano de la estructura (plano X, Y global), por lo que los grados de libertad del elemento (1,2-4,5 en el ejemplo anterior) en estas direcciones expresan desplazamientos en unidades de longitud y los grados de libertad normales al plano (3 y 6) expresan el giro en este eje en unidades de radianes.

Se tienen en cuenta los tres casos de desplazamiento para un pórtico plano causados por cargas en sus ejes:

○ Desplazamiento por Carga Axial

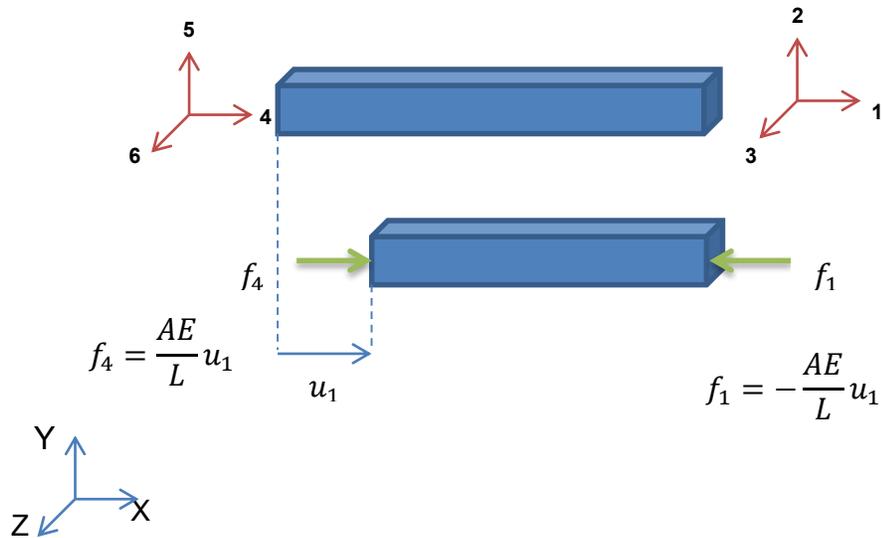


Ilustración 5: Desplazamiento producido por carga axial sobre el elemento (Autoría propia).

○ Desplazamiento por Carga Normal o Cortante:

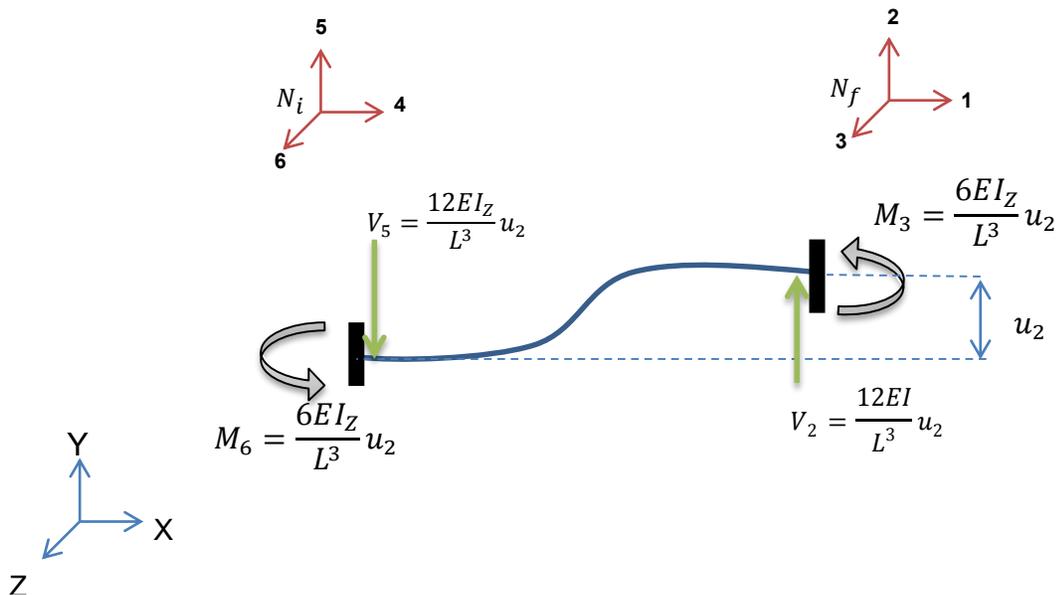


Ilustración 6: Desplazamiento producido por carga normal sobre el elemento (Autoría propia).

○ Giro por Flexión:

En los nodos también pueden existir fuerzas de momento inducidas o que resultan como producto de la reacción ante las fuerzas actuantes de los elementos aledaños al que esta es cuestión. Se considera entonces los grados de libertad de movimiento de giro en cada nodo. Importante recordar que en el análisis de pórtico plano con fuerzas actuantes en su plano solo se tiene en cuenta el giro en la dirección normal al plano, grados de libertad 9 y 12 en la figura que representan el giro en radianes (Ilustración 7).

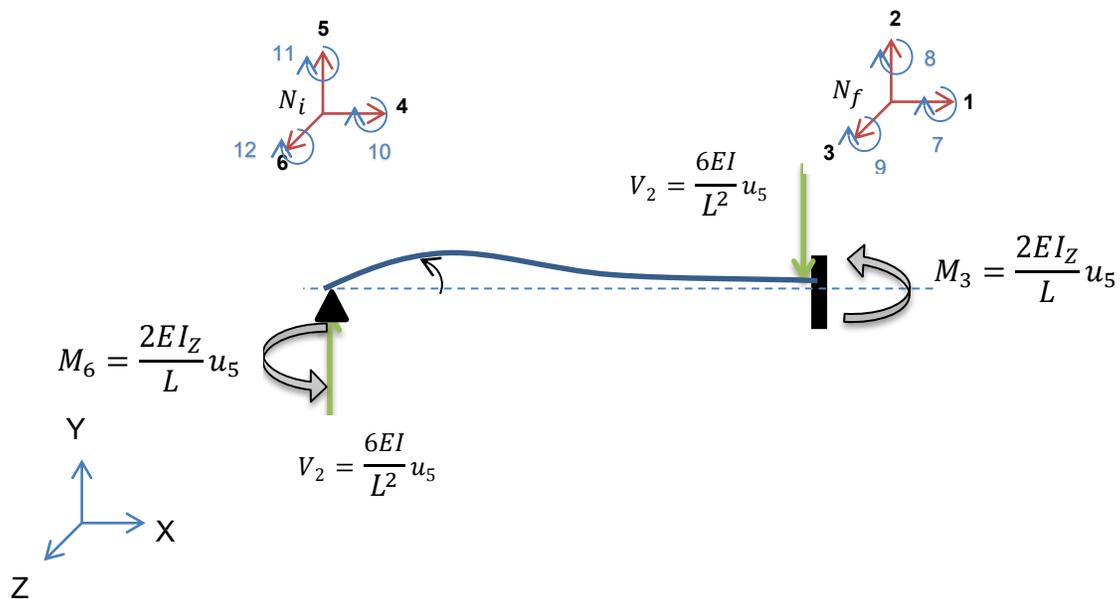


Ilustración 7: Giro por flexión producido por la acción de un momento en el nodo (Autoría propia).

### 2.2.2.2 Matriz de Transformación [T]:

Los términos definidos para la matriz de rigidez son resultado de fuerzas que actúan en los ejes del elemento, la matriz de rigidez de cada elemento está ordenada en el sistema de ejes normales a la sección del elemento, por lo tanto se hace necesario expresarla en

coordenadas globales de la estructura para realizar en ensamble de la matriz global de rigidez y proceder con el análisis (Ilustración 8).

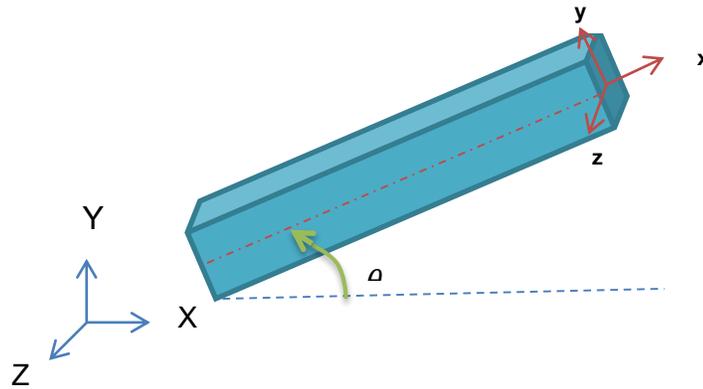


Ilustración 8: Elemento direccionado en su propio eje (Autoría propia).

Siendo  $\theta$  el ángulo de inclinación del elemento respecto a los ejes de coordenadas globales, se obtiene:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ 0 & 0 & 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Teniendo en cuenta la convención  $\{F\}$  para las fuerzas en los elementos expresadas en término globales y  $\{f\}$  para las fuerzas en cada grado de libertad del elemento expresadas en su eje coordenado, se obtiene:

$$\{F\} = \{f\}[T]$$

$$\{f\} = [k]\{u\}$$

$$\{U\} = [T]\{u\}$$

$$[T]^{-1}\{U\} = [T]^{-1}[T]\{u\} = \{u\}$$

$$\{f\} = [k][T]^{-1}\{U\}$$

$$\{F\} = [T][k][T]^{-1}\{U\}$$

Si

$$\{F\} = [K]\{U\}$$

Entonces

$$[K] = [T][k][T]^{-1}$$

Obtenemos entonces la matriz de rigidez de cada elemento en coordenadas globales, K:

$$[K] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 6 \end{matrix} & \begin{matrix} 7 & 8 & 12 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{AE}{L}CX^2 + \frac{12EI_z}{L^3}CY^2 \\ \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CY \end{matrix} & \begin{matrix} \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ \frac{AE}{L}CY^2 + \frac{12EI_z}{L^3}CX^2 \\ \frac{6EI_z}{L^2}CX \end{matrix} & \begin{matrix} -\frac{6EI_z}{L^2}CY \\ \frac{6EI_z}{L^2}CX \\ \frac{4EI_z}{L} \end{matrix} \\ \begin{matrix} -\frac{6EI_z}{L^2}CY \\ -\frac{AE}{L}CX^2 - \frac{12EI_z}{L^3}CY^2 \\ \left(-\frac{AE}{L} + \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CY \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{6EI_z}{L^2}CX \\ \left(-\frac{AE}{L} + \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{AE}{L}CY^2 - \frac{12EI_z}{L^3}CX^2 \\ \frac{6EI_z}{L^2}CX \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{4EI_z}{L} \\ \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CX \\ \frac{2EI_z}{L} \end{matrix} \\ \begin{matrix} -\frac{AE}{L}CX^2 - \frac{12EI_z}{L^3}CY^2 \\ \left(-\frac{AE}{L} + \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CY \end{matrix} & \begin{matrix} \left(-\frac{AE}{L} + \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{AE}{L}CY^2 - \frac{12EI_z}{L^3}CX^2 \\ \frac{6EI_z}{L^2}CX \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ \frac{6EI_z}{L^2}CY \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left(-\frac{AE}{L} + \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CY \end{matrix} & \begin{matrix} \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI_z}{L^3}\right) \cdot CX \cdot CY \\ \frac{AE}{L}CY^2 + \frac{12EI_z}{L^3}CX^2 \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CX \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ \frac{6EI_z}{L^2}CY \\ -\frac{6EI_z}{L^2}CX \\ \frac{4EI_z}{L} \end{matrix} \end{matrix}$$

Ilustración 9: Matriz de rigidez en coordenadas globales (Autoría propia).

Donde

1 y 7 son los grados de libertad en x expresados en X

2 y 7 en y expresados en Y

6 y 12 son los grados de libertad de giro en z local y Z global.

$$CX = \cos\theta$$

$$CY = \text{Sen}\theta$$

### 2.2.2.3 **Matriz de Rigidez Global [K]:**

Se procede a ensamblar la matriz de rigidez global (K). Se suman las expresiones y/o valores correspondientes al mismo grado de libertad. Así pues queda la matriz de rigidez global K simétrica.

### 2.2.2.4 **Vector de Fuerzas {F}:**

La estructura es sometida a cargas externas, las cuales se pueden expresar como reacciones o fuerzas sobre los nodos que constituyen los puntos inicial y final de cada elemento, así pues, se puede expresar de igual manera el vector de fuerzas especificando la magnitud y dirección en cada grado de libertad en coordenadas locales (del elemento). También existen cargas dispuestas en la luz del elemento, como cargas puntuales a cualquier distancia del nodo o cargas distribuidas a lo largo de la luz.

En este caso es necesario aplicar el principio de superposición aplicando cargas en los nodos en sentido contrario a las reacciones ocasionadas por las cargas reales pero con la misma magnitud, definiendo así el vector {F}.

$$\{F\} = \{N\} - \{L\}$$

## 2.2.3 PROGRAMAS COMPUTACIONALES

Se utilizaron diferentes programas computacionales (Matlab, Ansys, SolidWorks, Sap2000 y Excel) para la validación de algunos de los métodos analíticos que fueron utilizados; adicional estos programas computacionales se utilizaron a la final para el desarrollo de los modelos finales del proyecto.

## 2.3 MODELO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL (ELEMENTOS EN ACERO)

Se inicia con una búsqueda de métodos y ecuaciones que permitieran evaluar cada uno de los elementos, en la búsqueda se encuentra un grupo determinado de ecuaciones que evaluaban el comportamiento de resistencia mecánica de los distintos elementos que conformaban la edificación. Se presenta un resumen de algunas de las ecuaciones base que inicialmente fueron utilizadas para el pre-dimensionamiento del prototipo [20]–[26].

El procedimiento de análisis de vigas parte de un análisis global de las reacciones, los momentos y las deformaciones que pueden presentarse debido a una carga determinada y a la forma en que se encuentre apoyada la viga, para la revisión técnica solo se consideran vigas que se encuentren apoyadas Articulada – Articulada ó Empotrada – Empotrada

### 2.3.1.1 Vigas

Reacciones, momentos y deformaciones en la viga:

$$\sigma_{adm} [\text{Pa}] = \sigma_y * F_s$$

$$R1[\text{N}] = R2 = \frac{WL}{2}$$

$$M_{max} [\text{N. m}] = \frac{WL^2}{24} \text{ Viga Empotrada}$$

$$M_{max} [\text{N. m}] = \frac{WL^2}{8} \text{ Viga Articulada}$$

$$M_{min} [\text{N. m}] = -\frac{WL^2}{12} \text{ Viga Empotrada}$$

$$S \text{ viga} [\text{mm}^3] = M_{max} / \sigma_{adm}$$

$$\delta [m] = \frac{WL^4}{384 * \varepsilon * I_y} \text{ Viga Empotrada}$$

$$\delta [m] = \frac{5 * WL^4}{384 * \varepsilon * I_y} \text{ Viga Articulada}$$

$$\delta_{adm} [m] = L * \left( \frac{1}{360} - \frac{1}{800} \right)$$

Módulo de sección de la viga:

Relación entre la inercia del elemento y su altura media con respecto a un eje. (I/c)

$$cy [mm] = h/2$$

Si se realizan 2 o 3 perforaciones en el alma de la viga.

$$I_{\text{agujeros\_tw}} [mm^4] = 2 * \left( \varnothing_{\text{perno}} + \frac{1}{16} \right) * tw * (\text{Dist. } \perp)^2$$

Si se realizan 4 perforaciones en el alma de la viga.

$$I_{\text{agujeros\_tw}} [mm^4] = \left( 2 * \left( \varnothing_{\text{perno}} + \frac{1}{16} \right) * tw * (\text{Dist. } \perp)^2 \right) + \left( 2 * \left( \varnothing_{\text{perno}} + \frac{1}{16} \right) * tw * (3 * \text{Dist. } \perp)^2 \right)$$

$$h_{\text{req}} [mm] = (1.25 * \varnothing_{\text{perno}}) + (N_{\text{agujeros\_tw}} + 1)$$

$$I_{\text{agujeros\_tf}} [mm^4] = N_{\text{agujeros\_tf}} * \left( \varnothing_{\text{perno}} + \frac{1}{16} \right) * tf * \left( cy - \left( \frac{tf}{2} \right) \right)^2$$

$$S_{\text{agujeros\_tw}} [mm^3] = I_{\text{agujeros\_tw}} / cy$$

$$S_{\text{agujeros\_tf}} [mm^3] = I_{\text{agujeros\_tf}} / cy$$

$$S_{\text{neto}} [mm^3] = S_{\text{viga}} + S_{\text{agujeros\_tw}} + S_{\text{agujeros\_tf}}$$

Esfuerzo cortante en la viga:

$$Q [\text{mm}^3] = \left( \left( tw * \frac{h_{\text{alma}}}{2} \right) * \left( \frac{cy - tf}{2} \right) \right) + \left( (b * tf) * \left( cy - \frac{tf}{2} \right) \right) \text{ Teorema de Stainer}$$

El segundo momento de inercia (Q) considerado actualmente hace referencia a una viga tipo I ó W.

$$\tau [\text{MPa}] = \frac{V * Q}{I_y * tw}$$

$$\tau_{\text{adm}} [\text{MPa}] = 0.58 * \frac{\sigma_y}{1.8}$$

Esfuerzo por pandeo lateral:

Para el esfuerzo critico de pandeo debido a un apoyo en vigas tipo H y tipo I:

$$\sigma_{cr} [\text{Psi}] = \left( \frac{18.83 * 10^6}{\frac{Lu * h}{b * tf}} \right) / 1.8$$

Para vigas tipo C y tipo canal.

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$\sigma_{cr} [\text{Psi}] = \left( \frac{447.2 * 10^6}{\left( \frac{Lu}{r_y} \right)^2} \right) / 1.8$$

Distancia de refuerzos debido al pandeo lateral:

Distancia máxima del apoyo de las vigas con respecto al trabe.

$$h/t = h_{alma}/tw$$

$$D_{refuerzo} [in] = \frac{116}{\sqrt{\frac{1.8 * v}{10500} - \left(\frac{100}{\frac{h}{t}}\right)^2}} * tw$$

Conexiones en el alma:

La conexión del alma se realiza por dos diferentes tipos de uniones:

Unión simple: Se refiere a la unión que actúa a cortante simple.

Unión Rígida: Se refiere a la unión que actúa a cortante doble.

$$A_{perno} = \pi * \left(\frac{\phi_{perno}}{2}\right)^2$$

$$v_{adm} = A_{perno} * T_{adm\_pl} \quad \text{Unión Simple}$$

$$v_{adm} = 2 * A_{perno} * T_{adm\_pl} \quad \text{Unión Rígida}$$

$$Aplastamiento = N_{Agujeros\_tw} * \phi_{perno} * t_{platina} * \sigma_y_{platina}$$

Tabla 3: Variables cálculo de vigas

VARIABLES	DEFINICION
A	Área de la sección transversal de la viga
A_perno	Área de los pernos
b	Longitud del patín
cy	Altura media de la viga

D_ref	Distancia del refuerzo
Dist.⊥ Agujeros- Eje neutro	Distancia de los agujeros del alma al eje neutro de la viga
Dn AASHO	Distancia del refuerzo según norma AASHO
Dn AISC	Distancia del refuerzo según norma AISC
Dn AREA	Distancia del refuerzo según norma AREA
Fs	Factor de seguridad
h	Altura de la viga
h/t	Relación altura del alma vs espesor del alma
h_alma	Altura del alma
h_req	Altura de alma requerida (mm)
Ix	Inercia en x
Iy	Inercia en y
k	Distancia limite al filete (ménsula)
L	Longitud de la viga
Lu	Distancia de unión entre vigas
Mmax-negativo	Momento máximo negativo
Mmax-positivo	Momento máximo positivo
N	Longitud de apoyo (ménsula)
N Agujeros-tw	Cantidad de agujeros en el alma
N Agujeros-tf	Cantidad de agujeros en el patín
∅	Diámetro
R1	Reacción 1
R2	Reacción 2
ry	Radio de giro en Y
S Agujeros tw	Módulo de sección de los agujeros en el alma de la viga
S Agujeros tf	Módulo de sección de los agujeros en el patín de la viga
S Neto	Módulo de sección total
S Viga	Módulo de sección de la viga
tf	Espesor del patín
tw	Espesor del alma
v	Fuerza cortante

v <sub>adm</sub>	Fuerza cortante admisible
W	Carga
δ	Deformación de la viga
δ <sub>adm</sub>	Deformación permisible en la viga
ε	Módulo de elasticidad
σ <sub>adm</sub>	Esfuerzo admisible
σ <sub>y</sub>	Esfuerzo de fluencia del material
τ	Esfuerzo cortante
τ <sub>adm</sub>	Esfuerzo cortante admisible
τ <sub>adm_pl</sub>	Esfuerzo cortante admisible en platinas

### 2.3.1.2 Columnas

#### Esfuerzos de compresión permisibles en columnas:

El análisis del esfuerzo de compresión permisible en columnas depende de:

La relación entre la longitud y el radio de giro (L/r)

El esfuerzo de fluencia del material (σ<sub>y</sub>)

La forma de ensamble de la columnas (Pinned or Riveted ends)

#### *Columnas Pinned ends:*

Para un σ<sub>y</sub> de 33000 Psi:

$$P/A = 15000 - 0.325 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 140$$

$$P/A = \frac{15000}{0.5 + \frac{1}{15860} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 140 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 45000 Psi:

$$P/A = 20500 - 0.605 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 120$$

$$P/A = \frac{20500}{0.5 + \frac{1}{11630} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 120 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 50000 Psi:

$$P/A = 22500 - 0.738 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 110$$

$$P/A = \frac{22500}{0.5 + \frac{1}{10460} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 110 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 55000 Psi:

$$P/A = 25000 - 0.902 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 105$$

$$P/A = \frac{25000}{0.5 + \frac{1}{9510} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 105 - 200$$

### *Columns Riveted ends*

Para un  $\sigma_y$  de 33000 Psi:

$$P/A = 15000 - 0.253 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 155$$

$$P/A = \frac{15000}{0.5 + \frac{1}{20370} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 155 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 45000 Psi:

$$P/A = 20500 - 0.471 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 135$$

$$P/A = \frac{20500}{0.5 + \frac{1}{14930} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 135 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 50000 Psi:

$$P/A = 22500 - 0.574 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 125$$

$$P/A = \frac{22500}{0.5 + \frac{1}{13440} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 125 - 200$$

Para un  $\sigma_y$  de 55000 Psi:

$$P/A = 25000 - 0.702 * \left(\frac{L}{r}\right)^2 \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 0 - 120$$

$$P/A = \frac{25000}{0.5 + \frac{1}{12220} * \left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ Para valores de } (L/r) \text{ entre } 120 - 200$$

Carga excéntrica en columnas:

$$r(x, y) = \sqrt{\frac{I(x, y)}{A}} \text{ Radio de giro en } (x, y)$$

$$L' = L * k$$

Donde cada k es el valor teórico de fijación en los extremos y depende de la forma en la que se encuentre apoyada la columna.

Tabla 4: Longitudes efectivas para columnas

LONGITUDES EFECTIVAS PARA COLUMNAS	
Valor teórico K	Tipo de apoyo
0,5	Empotrado-Empotrado
0,7	Empotrado-Articulado
1,0	Articulado-Articulado
2,0	Empotrado-Libre
1,0	Empotrado-Libre (Traslación)
2,0	Articulado-Libre (Traslación)

$$S_x = \frac{P'}{A} * Sec \left( \sqrt{\frac{P'}{A * \varepsilon} * \left( \frac{L'}{2 * r_x} \right)} \right) * \frac{e_x * c_x}{r_x^2}$$

$$S_y = \frac{P'}{A} * Sec \left( \sqrt{\frac{P'}{A * \varepsilon} * \left( \frac{L'}{2 * r_y} \right)} \right) * \frac{e_y * c_y}{r_y^2}$$

$$S_{max} = P/A + S_x + S_y \text{ sin factor de excentricidad}$$

$$S_{adm} = S_{max}/1.8$$

$$S_x = \frac{P'}{A} * \text{Sec} \left( \sqrt{\frac{P'}{A * \varepsilon} * \left( \frac{L'}{2 * r_x} \right)} \right) * \left( \frac{e_x * c_x}{r_x^2} + 0.25 \right)$$

$$S_y = \frac{P'}{A} * \text{Sec} \left( \sqrt{\frac{P'}{A * \varepsilon} * \left( \frac{L'}{2 * r_y} \right)} \right) * \left( \frac{e_y * c_y}{r_y^2} + 0.25 \right)$$

$$S_{max} = S_x + S_y - P/A \text{ con factor de excentricidad} + 0.25$$

$$S_{adm} = S_{max}/1.8$$

Esfuerzo critico de compresión en el alma:

$$n = \frac{\sqrt{\sigma_y^3}}{4770} \text{ Constante}$$

$$\frac{b/tw}{\sqrt{k}}$$

$$S_{cr} = \sigma_y \text{ para valores de } \frac{b/tw}{\sqrt{k}} \text{ entre } 0 - \frac{3820}{\sqrt{\sigma_y}}$$

$$S_{cr} = 1.8 * \sigma_y - n * \left( \frac{b/tw}{\sqrt{k}} \right) \text{ para valores de } \frac{b/tw}{\sqrt{k}} \text{ entre } \frac{3820}{\sqrt{\sigma_y}} - \frac{5720}{\sqrt{\sigma_y}}$$

$$S_{cr} = \frac{19660000 * k}{\left( \frac{b}{tw} \right)^2} \text{ para valores de } \frac{b/tw}{\sqrt{k}} \text{ mayores a } \frac{5720}{\sqrt{\sigma_y}}$$

Relación de esbeltez

$$\frac{KL}{r}$$

$$C_c = \frac{2\pi * \varepsilon}{\sigma_y}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\left(1 - \frac{(KL/r)^2}{2 * Cc^2}\right) * \sigma_y}{\frac{5}{3} + \frac{3 * (KL/r)}{8 * Cc} - \frac{(KL/r)^3}{8 * Cc^3}} \text{ Para valores de } \frac{KL}{r} < Cc$$

$$\sigma_{adm} = \frac{12\pi * \varepsilon}{23 * (KL/r)^2} \text{ Para valores de } \frac{KL}{r} > Cc$$

$$P_{adm} = \sigma_{adm} * A$$

Diseño de la placa base:

$$A_{placa\_req} = \frac{W}{\sigma_{y\_adm\_concreto}}$$

$$LxL \text{ placa} = \text{redondear}(\sqrt{A_{placa\_req}})$$

$$A_{placa\_real} = (LxL \text{ placa})^2$$

$$\sigma_{y\_placa} = \frac{W}{A_{real\_placa}}$$

$$n = \frac{LxL \text{ placa} - 0.8 * b}{2}$$

$$m = \frac{LxL \text{ placa} - 0.95 * h}{2}$$

$$t_{placa\_n} = \sqrt{\left(\frac{3 * \sigma_{y\_placa} * n^2}{\sigma_y * 0.75}\right)}$$

$$t_{placa\_m} = \sqrt{\left(\frac{3 * \sigma_{y\_placa} * m^2}{\sigma_y * 0.75}\right)}$$

Tabla 5: Variables cálculo columnas

<b>VARIABLES</b>	<b>DEFINICION</b>
A/S	Factor de flexión
A_placa_req	Área requerida en la placa base
A_placa_real	Área real de construcción de la placa base
b	Longitud del patín
b (h_alma)	Altura del alma
Cc	Relación de esbeltez
cx	Ancho medio de la viga
cy	Altura media de la viga
ex	Excentricidad respecto a x
ey	Excentricidad respecto a y
h	Altura de la viga
Ix	Inercia en x
Iy	Inercia en y
k	Coefficiente adimensional de la placa (Alma)
M_Sx	Esfuerzo promedio de excentricidad en x
M_Sy	Esfuerzo promedio de excentricidad en y
M_Smax	Esfuerzo promedio de excentricidad máximo
M_Sadm	Esfuerzo promedio de excentricidad admisible
L	Longitud de la columna
L'	Longitud efectiva de la columna
LxL_placa	Longitud del lado de la placa
P'	Carga ultima sin factor de seguridad
P_adm	Carga admisible
rx	Radio de giro en x
ry	Radio de giro en y
Scr	Esfuerzo critico de compresión
Smax	Esfuerzo de excentricidad máximo
Sx	Esfuerzo de excentricidad en x
Sy	Esfuerzo de excentricidad en y

$\sigma_{adm\_concreto}$	Esfuerzo admisible del concreto
$\sigma_{placa}$	Esfuerzo en la placa
$t_{placa}$	Espesor de la placa base
$tw$	Espesor del alma



### **3 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO**

Para el diseño de cada uno de los módulos y componentes asociados, se lleva a cabo una discriminación y definición de las necesidades, metodologías de diseño, herramientas técnicas y establecer los principios básicos de diseño que son llevados a la mesa de evaluación y caracterizados según el deseo y los puntos que se requieren solucionar [12]. Para el desarrollo del modelo constructivo se plantean las condiciones de diseño, las metodologías, los materiales y por último el diseño final del modelo. El sistema propuesto no está contemplado en otros sistemas hasta la fecha.

#### **3.1 CONDICIONES DE DISEÑO**

El sistema MPOSS (Modular Prefabricated Off-Site System) se diseña a partir de un compendio de características y principios de dos de los sistemas constructivos hoy en día existentes (sistema Tradicional y OSC) como criterios principales de diseño, evaluando tanto los aspectos positivos como negativos de cada uno de los sistemas. Para el diseño de los MPOSS se toman como base metodologías como Lean Construction, Green Building y Design For Assembly [7], [12], [27] las cuales fueron integradas, valoradas y priorizadas para luego ser asociadas al diseño de cada uno de los elementos constructivos, considerando a su vez la selección de materiales, procesos, controles y métodos de fabricación (ver Ilustración 10).

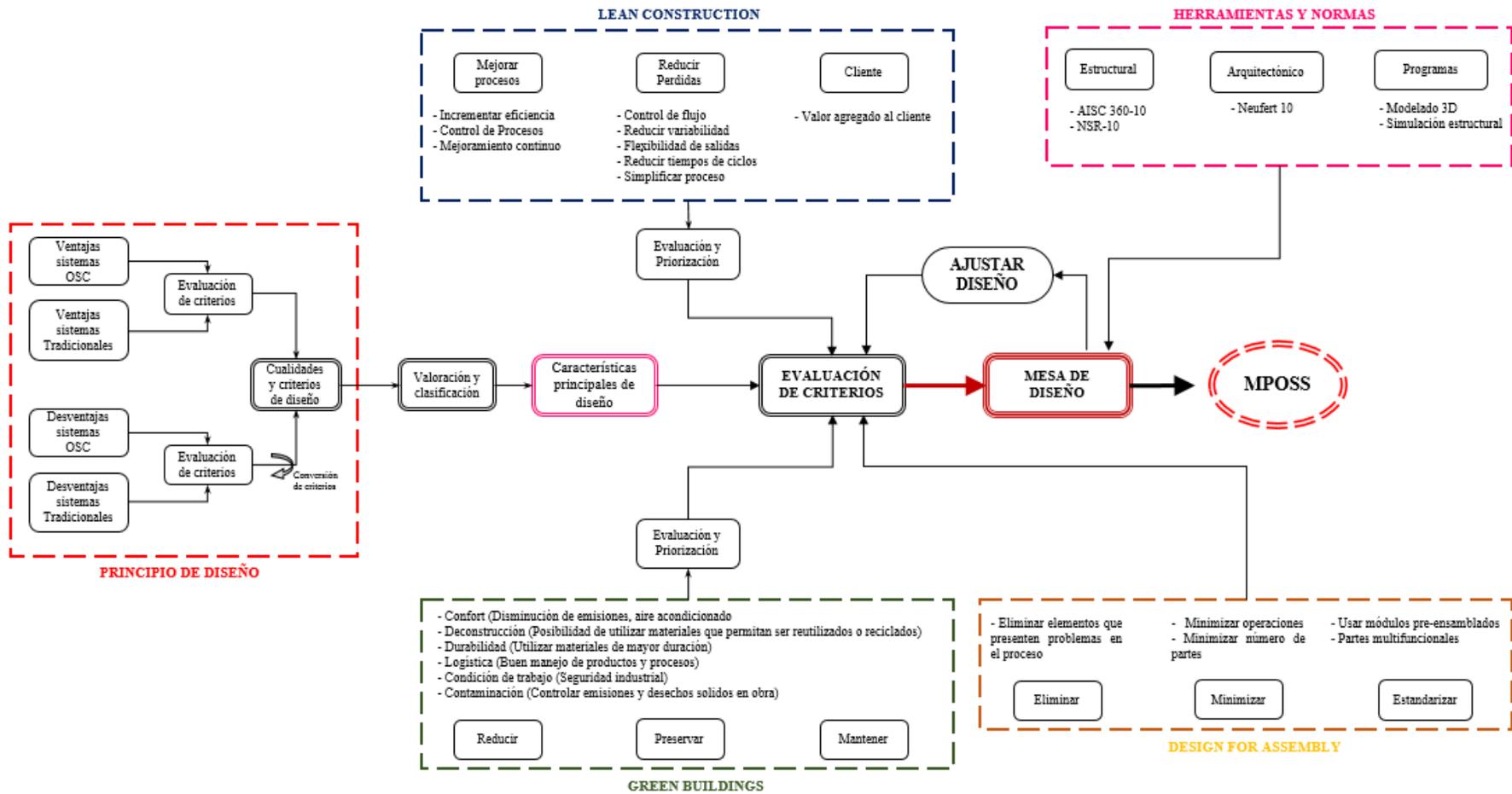


Ilustración 10: Diagrama de diseño evaluativo MPOSS (Autoría propia).

### 3.1.1 MATERIALES

Dentro de la metodología de Green Buildings [12] la selección de materiales está influenciada por criterios de sustentabilidad; se tomaron como criterio de diseño:

- Materiales livianos.
- Materiales durables y resistentes.
- Materiales reutilizables o reciclables.

Los materiales que fueron utilizados para el diseño de cada uno de los componentes son principalmente el acero estructural como elemento primario para soportar las cargas, y fibra de vidrio para el desarrollo de los pisos y divisiones principales de la edificación. Para la valoración inicial y caracterización de la fibra de vidrio, se desarrollaron algunos ensayos experimentales con el fin de evaluar distintos criterios. En análisis se presenta en los capítulos posteriores.

### 3.1.2 HERRAMIENTAS TÉCNICAS

Para el diseño y consideración de todos los aspectos se consideraron metodologías y normas para la consolidación del sistema:

- Design for Assembly.
- Green Buildings [12].
- Lean Contructions [12].
- Norma de sismo resistencia colombiana NSR-10 [28].
- Norma American Institute of Steel Construction AISC-360 2010 [29].
- Programas de simulación 3D y diseño estructural (MEF).
- Libros educativos de diseño y prácticas de construcción [20], [30]–[34].

### **3.1.3 DISEÑO DE MPOSS**

Los MPOSS son diseñados partiendo de la segmentación de las actividades principales del proceso constructivo en tareas y procesos más pequeños, que permiten a su vez tener un mayor control e independencia [2]. El sistema constructivo MPOSS está compuesto por tres principales grupos: módulo de entepiso, módulo de columnas receptoras y módulo de fachada. Cada uno de ellos cuenta con diferentes sub-procesos los cuales están organizados y valorados según la participación en el proceso de conformación de cada módulo. Cada grupo cuenta con un desarrollo controlado por matriz de conformación estructural. Este proceso de conformación de cada uno de los grupos es fabricado en espacios cerrados y controlados, para ser luego almacenados, transportados y ensamblados en el sitio de construcción (Ilustración 11).

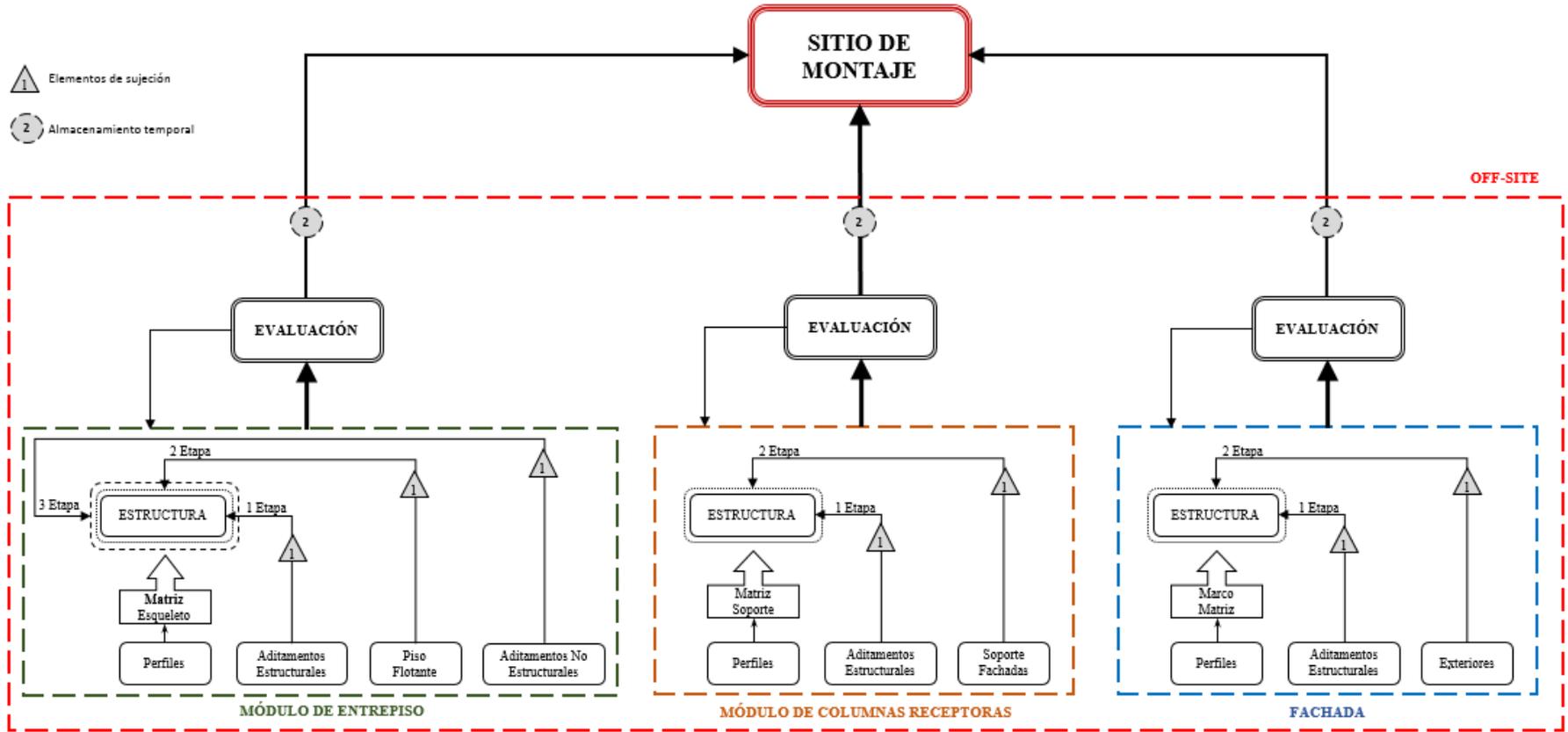


Ilustración 11: Diagrama de conformación de partes, sub-ensamble y Ensamble de MPOSS (Autoría propia).

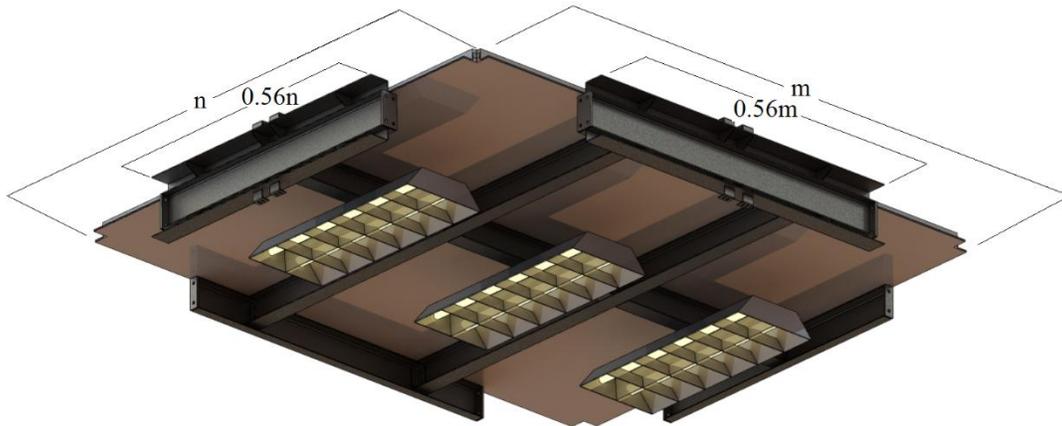
## 3.2 CARACTERISTICAS FISICAS DE MPOSS

### 3.2.1 MÓDULO DE ENTREPISO

Cada módulo de entrepiso está conformado por secciones virtuales rectangulares<sup>4</sup> de dimensiones  $m \times n$  (siendo  $n \leq 3500mm$  y  $m \leq 9000mm$ ). El contorno perimetral de cada uno de los módulos de entrepiso está fabricado utilizando un sistema de soporte independiente perimetral tipo viga, de sección abierta o cerrada, los cuales tienen una longitud de  $0,56 \times m$  y  $0,56 \times n$  respectivamente. Los perfiles perimetrales son ubicados centrados a  $0,5 \times m$  y  $0,5 \times n$  respectivamente. Existen dos diferentes tipos de perfiles perimetrales: internos y externo. Los internos se refieren a los perfiles que tienen de manera adyacente otro módulo de entrepiso; los externos se refieren a los perfiles de borde de la edificación. Las vigas perimetrales están intercomunicadas por medio de nervios simplemente apoyados de dimensiones  $m \times n$ , direccionados de manera longitudinal y transversalmente. El número de nervios ( $i$ ) sobre el marco de  $m \times n$  está dado por el ciclo iterativo  $\frac{m}{i} \leq 1500mm$  y  $\frac{n}{i} \leq 1500mm$ . El número total de nervios se ubican a una distancia  $p = \frac{m}{i}$  y  $\frac{n}{i}$  respectivamente (Ilustración 12).

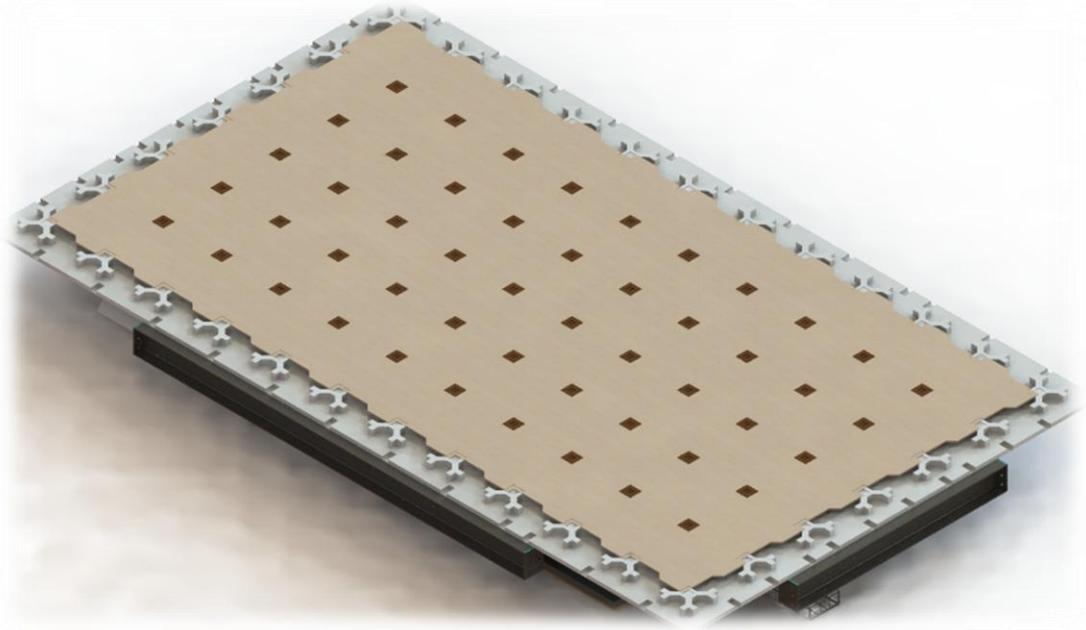
---

<sup>4</sup> Se define como secciones rectangulares virtuales al contorno incompleto que posee el módulo de entrepiso en sus esquinas.

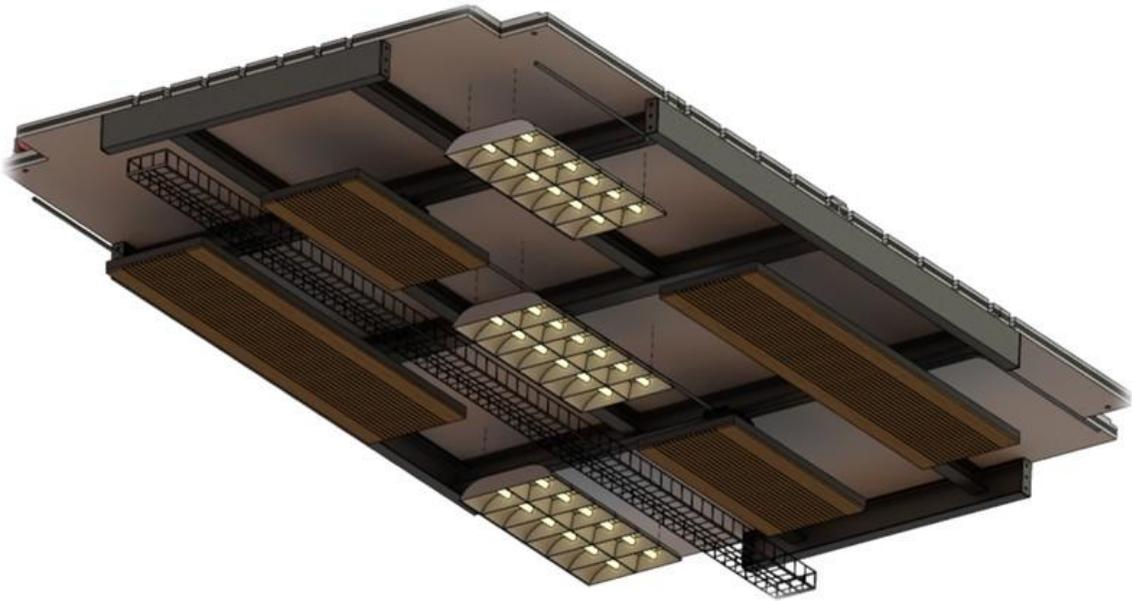


*Ilustración 12: Entrepiso metálico (Autoría propia).*

A una distancia  $x = 0$  y  $x = 0,56 \times m$ ;  $x = 0,56 \times n$  de la viga perimetral, le corresponde una placa de conexión de dimensiones  $b \times h$ , siendo  $b$  y  $h$  respectivamente el ancho y la altura total del perfil de la viga perimetral. La placa de conexión une el módulo de entrepiso con el módulo de columna receptora por medio de elementos de sujeción tipo perno. En la cara superior de la estructura se colocan simplemente apoyados los módulos superficiales tipo piso, los cuales son componentes pre-fabricados en un aglomerado en fibra de vidrio, espuma de poliuretano y neopreno con una densidad total de  $540 \text{ kg/m}^3$ , con un espesor de 50 mm.



*Ilustración 13: Sistema prefabricado modular Off-Site (Autoría propia).*



*Ilustración 14: Vista posterior del módulo de entrepiso (Autoría propia).*

### 3.2.2 COLUMNAS RECEPTORAS

Cada columna receptora cuenta con un elemento estructural vertical de longitud  $L \leq 4500mm$ . Cada elemento estructural vertical tiene articulado así secciones de perfil tipo viga correspondientes al perfil del módulo de entrepiso a conectar. Cada sección de perfil tipo viga tiene una longitud  $l = 0,22 \times m$  y  $0,22 \times n$  respectivamente, ubicado a una distancia de  $L - 500mm$  que parte del borde del elemento estructural vertical. En el borde de cada sección de perfil tipo viga, tiene una placa de conexión de dimensiones  $b \times h$ , siendo  $b$  y  $h$  respectivamente el ancho y la altura total del perfil, que une el módulo de columnas receptoras con los módulos de entrepiso por medio de elementos de sujeción tipo perno. Cada columna tiene un número ( $a$ ) de secciones de vigas articuladas (de 0 a 4) que dependen de la posición y la configuración donde es ensamblada la columna. Cada módulo de columna receptora se conecta entre sí por medio de placas unidas en los bordes de los elementos estructurales verticales, los cuales son peroados con el siguiente módulo.



*Ilustración 15: Columnas Receptoras (Autoría propia).*

### **3.2.3 MÓDULO DE FACHADA**

Cada módulo de fachada está compuesto por un marco estructural rectangular, de sección transversal cerrada, de dimensiones exteriores de  $r \times t$ , donde:

$$r = [1250 - 1500 \text{ mm}]$$

$$t = \text{Altura de nivel} - h - 2 \times C_k$$

$h$  = altura del perfil

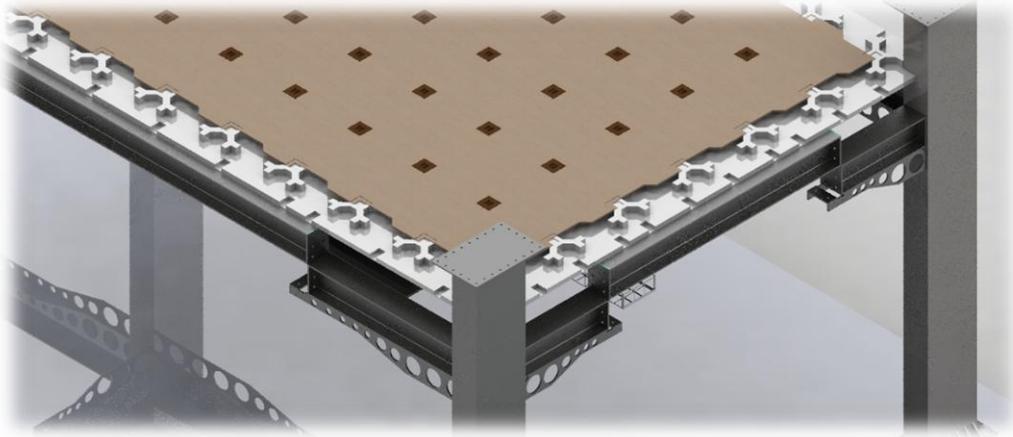
$C_k$  = Coeficiente dimensional de apertura de fachada.

Cada marco estructural posee 4 terminales de apoyo para su ensamble con el módulo de entrepiso. El material de la fachada se determina según los requerimientos.

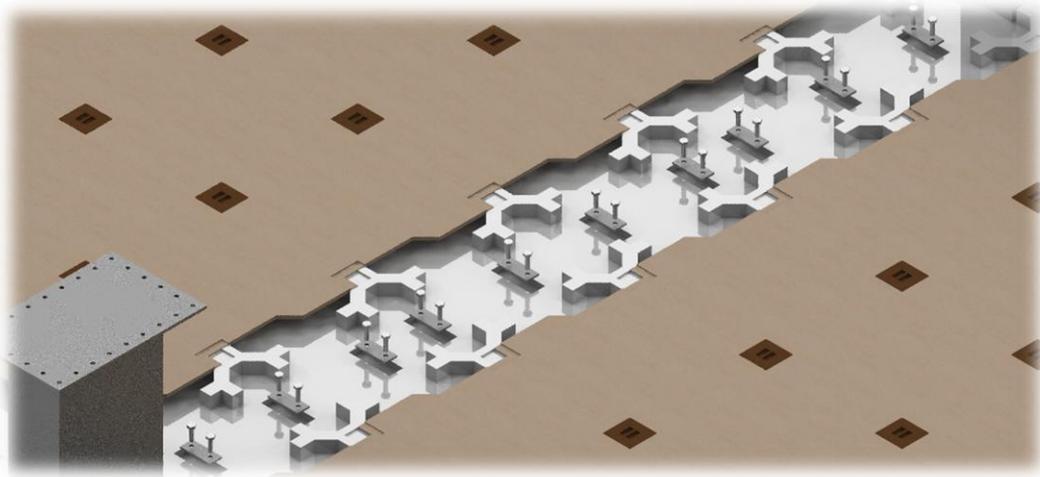
### **3.2.4 MODO DE ENSAMBLE**

Para la instalación de un módulo de entrepiso se requiere de 4 módulos de columnas receptoras, las cuales son instaladas por medio de pernos de anclaje sobre una losa nivelada de concreto. El módulo de entrepiso, conformado por la estructura principal, el módulo superficial tipo piso y los elementos no estructurales (Sistemas de iluminación pre-ensamblada, redes principales y acabados), es deslizado y llevado a punto sobre los apoyos de las columnas receptoras, para luego ser pernada. Los módulos de fachada y muros divisorios se instalan luego de finalizar con la instalación de mínimo dos niveles de piso los cuales son apoyados sobre los soportes que poseen las vigas perimetrales exteriores de los módulos de entrepiso para luego ser pernados.

Luego de la instalación de los módulos de entrepiso y los módulos de columnas receptoras, se conectan las vigas perimetrales internas de los módulos de entrepiso por medio de platinas y pernos de alta resistencia generando una conexión rígida entre los componentes estructurales de los módulos.



*Ilustración 16: Ensamble de módulo de entrepiso y columnas receptoras (Autoría propia).*



*Ilustración 17: Unión perimetral de dos módulos (Autoría propia).*



## 4 DISEÑO DEL SISTEMA DE PISO

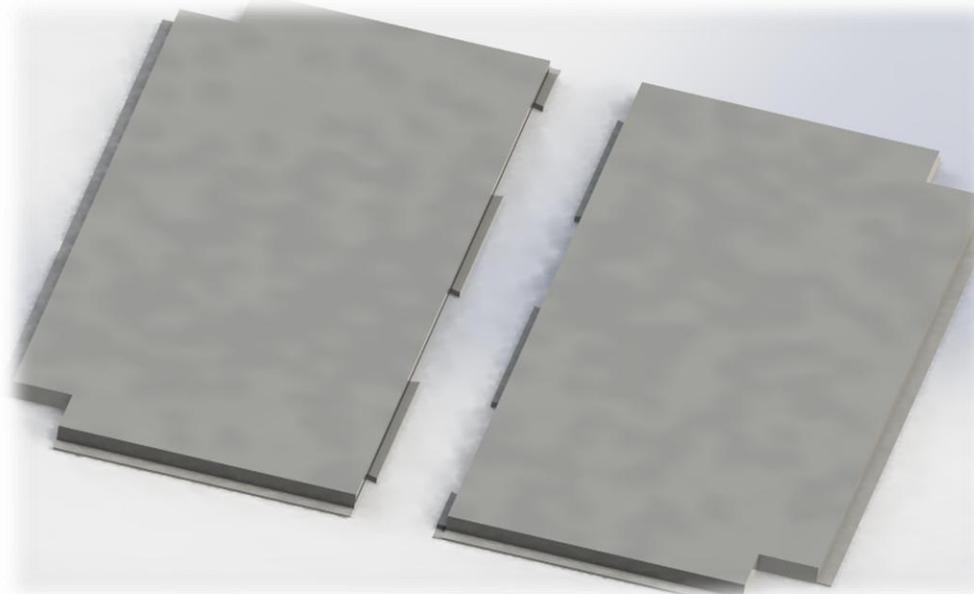
El piso consiste en un compuesto tipo sandwich compuesto por diferentes materiales los cuales tienen funciones específicas. Se utiliza como material base estructural la fibra de vidrio, en la mayor medida, la resistencia a flexión del piso. Adicional se utilizaron diferentes materiales como la espuma de poliuretano y neopreno para mejorar la capacidad de absorción acústica y aislamiento acústico.

El sistema de piso se diseña con el objetivo de reducir la carga muerta presente en la edificación, además otorgar un sistema prefabricado de alta duración y resistencia mecánica, con acabados y sistemas de redes pre-instaladas.

Para el modelo se realizan dos diferentes modelos de piso:

- *Modelo simple reticular*: Este modelo piso consiste en un sandwich compuesto por una superficie fibra de vidrio, neopreno, espuma de poliuretano, una omega en fibra de vidrio y una superficie en fibra de vidrio de 7cm de espesor, de dimensiones aproximadas de 3,5m de largo x 1,5 m de ancho. Cada lámina de piso está diseñada para que uno de sus extremos longitudinales posea un patrón trapezoidal de bloqueo horizontal y además de encaje por inversión; esto quiere decir que al girar 180° la sección de piso permite encajar con otra sección.

El costo del producto cotizado puede estar aproximadamente en 150000 mil pesos el metro cuadrado, el cual incluye el acabado superficial del elemento.



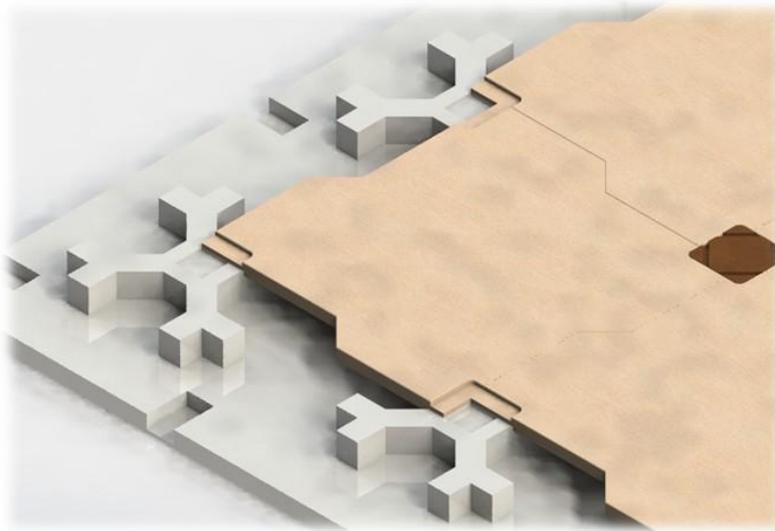
*Ilustración 18: Modelo simple reticular (Autoría propia).*

- Modelo estructural de piso suspendido: Este sistema se diseña con el propósito de suministrar el sistema de redes de servicio eléctrico en medio del piso. Es diseño consiste en la creación de pequeñas placas de 50 cm x 50 cm x 1cm de espesor. Cada placa posee un patrón de encaje en la cara posterior y lateral el cual coincide con una superficie con relieve en la parte inferior. La superficie con relieve es diseñada con el objetivo de soportar las cargas y adicional permitir el ingreso de las redes eléctricas inmersas para luego ser sacadas por las placas superficiales.

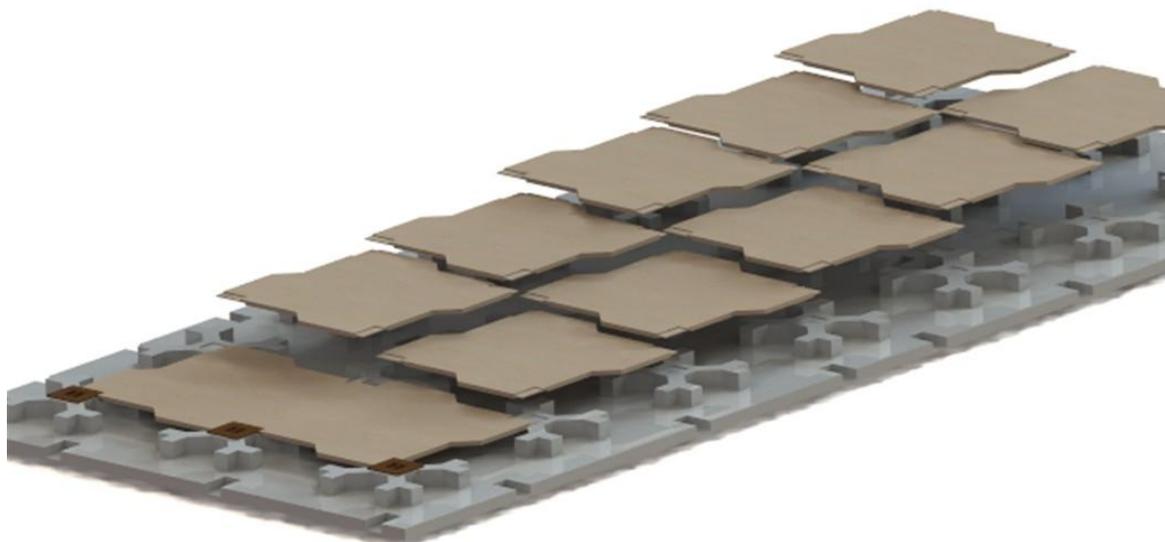
El material tanto de las placas superficiales como de la placa base, son realizadas en fibra de vidrio utilizando moldes de conformación.



*Ilustración 19: Placas superficiales de piso suspendido (Autoría propia).*



*Ilustración 20: Ensamble placas superficiales con placa base (Autoría propia).*



*Ilustración 21: Ensamble de placas superficiales con placa base (Autoría propia).*

## **4.1 ENSAYOS EXPERIMENTALES**

### **4.1.1 DEFINICIÓN DE PRUEBA**

Los resultados presentados se realizaron con equipos especializados utilizados normalmente para determinar propiedades físicas y mecánicas de elementos estructurales tradicionales (Concreto, acero, baldosas) regidos y calibrados bajo norma; sin embargo, por ser un elemento compuesto con propiedades y características no estandarizadas, los resultados obtenidos solo son para idealizar las características y propiedades del elemento; algunas de las pruebas no están regidas por norma y fueron realizadas a criterio propio.

#### 4.1.2 DESCRIPCIÓN DE PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS VISUALES DEL ELEMENTO

El compuesto tipo sánduche está conformado por dos láminas en fibra de vidrio separadas alrededor de 50 a 60mm entre ellas, en su interior está compuesto por resina de poliuretano y un sistema de Omega en fibra de vidrio.



*Ilustración 22: Sánduche de fibra de vidrio (Autoría propia).*

Las pruebas de densidad fueron realizadas retirando muestras volumétricas de 50x50x57 mm y 100x100x62mm aproximadamente; fueron pesadas en balanzas digitales las cuales arrojaron los siguientes resultados.

*Tabla 6: Dimensiones y propiedades de probetas*

# Muestra	Ancho (cm)	Largo (cm)	Alto (cm)	Masa (gr)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
1	10,00	10,00	6,20	151,22	620,00	0,24
2	9,80	10,20	6,30	144,82	629,75	0,23
3	5,10	5,10	5,80	34,91	150,86	0,23
4	5,00	5,20	5,70	35,91	148,20	0,24

#### 4.1.2.1 **Resultado sPreliminares:**

Por ser un material compuesto pueden existir variaciones de masa y volumen debido a su irregularidad, sin embargo las 4 muestras realizadas aleatoriamente mostraron una relativa similitud en la densidad del componente de **230 Kg/m<sup>3</sup>**.

#### 4.1.3 **RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

Se realiza una prueba de resistencia a la flexión al compuesto utilizando una muestra de dimensiones de 1200x400x60 mm. Los apoyos fueron puestos a una distancia igual al 10% de la longitud total del elemento; la intensidad de la carga es aplicada porcentualmente hasta llegar a punto de quiebre del elemento.

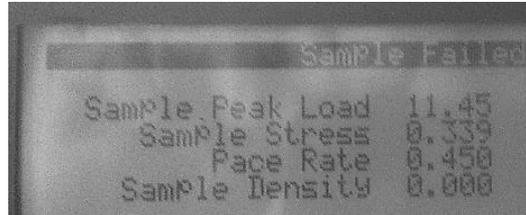


*Ilustración 23: Muestra y ensayo de resistencia a flexión (Autoría propia).*

#### 4.1.3.1 **Resultados Preliminares:**

El componente presenta una buena resistencia a la flexión con una deflexión en una longitud no apoyada de 900mm alrededor de 30mm, sin embargo la resistencia

alcanzada al punto de quiebre (antes de que el elemento falle, la resina de poliuretano se despegue) es de **11.45kN**.

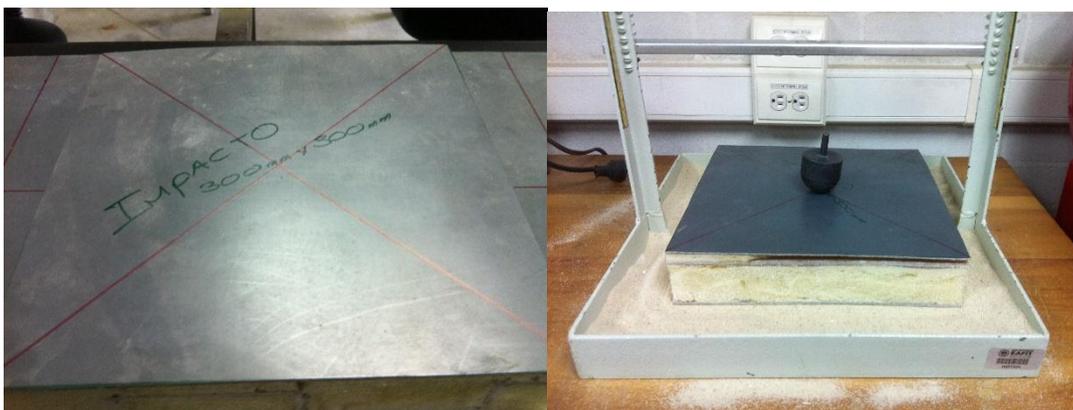


*Ilustración 24: Foto resistencia a la flexión de elemento (Autoría propia).*

#### **4.1.4 RESISTENCIA IMPACTO**

La prueba de impacto es una prueba que determina la resistencia a fatiga por impacto a elementos que van a estar propensos a golpes como el caso de baldosas o pisos. El objetivo de la prueba es llegar al límite de impacto y generar una fisura o agrietamiento de la probeta.

Para realizar la prueba se utilizó una muestra de 300x300x60 mm donde es puesta sobre la mesa de impacto, por encima se coloca una pesa de 590 gramos a una altura inicial de 120mm, la cual será soltada sobre el elemento de muestra; la altura de la caída va aumentando paulatinamente (Max 560mm) hasta que el elemento presente alguna fisura o agrietamiento.



*Ilustración 25: Prueba de Impacto (Autoría propia).*

#### **4.1.4.1 Resultados Preliminares:**

La muestra supero los 560mm de altura sin ninguna fisura o agrietamiento, esto debido a que el material superficial al ser tan elástico genera alta resistencia al impacto, adicional la resina de poliuretano sirve como sistema de amortiguación del golpe.

#### **4.1.5 RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

La resistencia a la compresión es una prueba que se realiza para determinar la resistencia y el comportamiento físico del elemento sometido a carga transversal.

Para realizar la prueba se utilizaron diferentes configuraciones con probetas de 100x100x60; la primera fue realizada utilizando dos probetas una encima de otra y fueron sometidas a una compresión gradual; la segunda prueba fue realizado solo a una probeta.



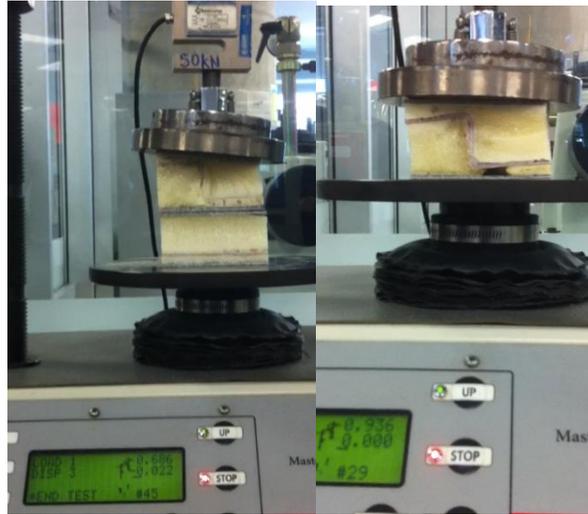
*Ilustración 26: Ensayo a compresión (Autoría propia).*

#### **4.1.5.1 Resultado Preliminar:**

La resina de poliuretano no es resistente a la compresión por su configuración y densidad, por lo tanto la omega interna resiste toda la fuerza de compresión, como la fuerza es aplicada uniformemente distribuida sobre la superficie, existen zonas de alta deformación por aplastamiento.

En la probeta de doble bloque, la máxima fuerza soportada fue de: **675N**

La probeta de simple bloque registró una fuerza máxima de: **900N**



*Ilustración 27: Resultado del ensayo (Autoría propia).*

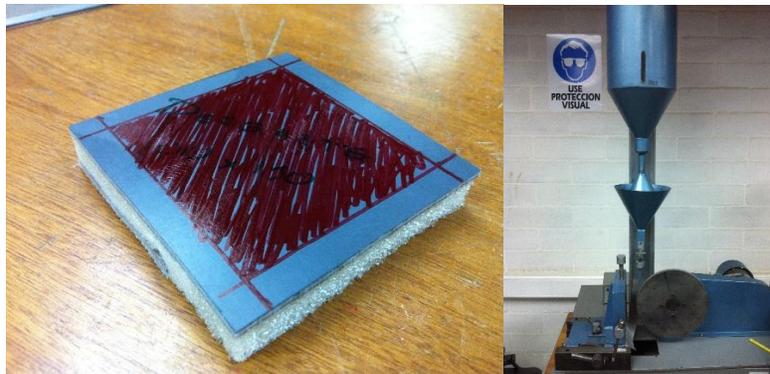
**Consideraciones:** La resistencia del elemento a compresión radica en la inercia y resistencia vertical que le otorga la Omega. Por lo tanto se realizaron separaciones de menor distancia con el objetivo de aumentar la rigidez y resistencia a compresión del elemento.



*Ilustración 28: Disminución de distancia de Omega (Autoría propia).*

#### 4.1.6 RESISTENCIA AL DESGASTE

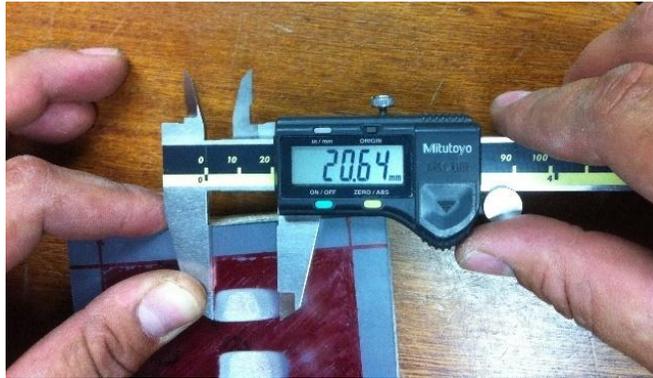
La prueba de resistencia al desgaste consiste en poner a prueba la fricción de un disco giratorio con un elemento aportante que entra en contacto con la probeta de prueba desgastando porcentualmente el elemento simulando un contacto natural de tránsito. Para la realizar la prueba se utilizaron probetas de 100x100x30 mm las cuales se le realizó una coloración de la superficie con el objetivo de percibir mejor el desgaste al final de la prueba. El proceso de desgaste se realiza durante un minuto consecutivo.



*Ilustración 29: Prueba de fricción. (Autoría propia).*

##### 4.1.6.1 Resultados Preliminares:

La superficie de fibra posee buenas propiedades al desgaste a pesar de tener solo 5 mm de espesor, mostraron huellas de desgaste alrededor de **20mm**, siendo inferior a la de una baldosa común residencial u educativo (Max 32mm).



*Ilustración 30: Resultado de desgaste (Autoría propia).*

#### **4.1.7 RESISTENCIA AL DESGARRE**

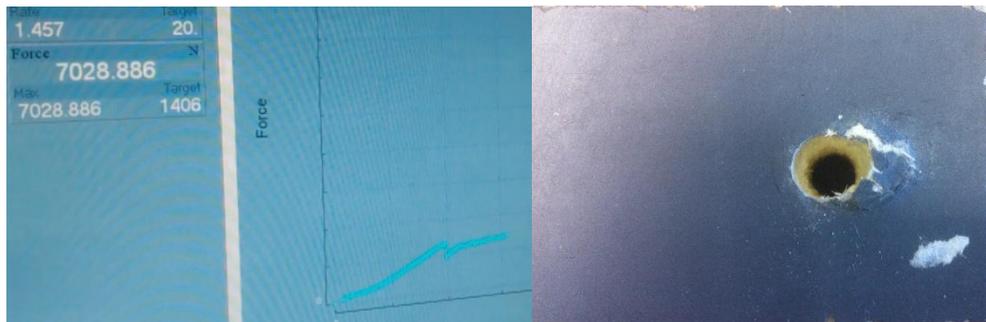
La prueba consiste en definir la fuerza necesaria, en un plano horizontal, para hacer fallar el material. El proceso de desgarre fue definido tomando una probeta de 200x50x50 mm la cual fue perforada y sujeta con perno de 3/8 y un sistema de orejas para el agarre del equipo universal.



*Ilustración 31: Resistencia al desgarre de una sección de piso (Autoría propia).*

#### 4.1.7.1 Resultados Preliminares:

A medida que el elemento es sometido a tensión, las paredes de la fibra empiezan a comprimirse sin generar fisuras o agrietamiento, el punto de falla se presenta al momento del despegue de la resina de poliuretano con la fibra de vidrio, sin embargo al retirar los pernos, la fibra de vidrio presentó un aplastamiento por la tensión. El equipo registró una fuerza máxima de **7000N a tensión**.



*Ilustración 32: Resultados de pruebas a desgarre por tensión (Autoría propia).*

#### 4.1.8 APRIETE DE PERNOS

El ensayo consiste en llevar al límite el material al ser comprimido por pernos por medio de un torquímetro de torque; para el ensayo se utilizó una probeta de 100x100x60 la cual fue perforada y perñada con un perno de 3/8in. El ensayo se realiza llevado el perno a incrementos porcentuales de torque controlado hasta que el material falle.

**Nota:** Para la tuerca se le colocó una platina de 50x50x5mm de espesor debido a que se quería simular el sistema de unión.



*Ilustración 33: Apriete de pernos (Autoría propia).*

#### **4.1.8.1 Resultados Preliminares:**

Según la configuración interna de la omega y la forma de colocación de la cabeza del perno con respecto a esta, entrega resultados con grandes diferencias en las resistencias de apriete.

Cabeza de perno sobre zona con omega, presentó una alta de **70Nm** con una deformación de **4-5 mm**.



*Ilustración 34: Deformación por apriete de perno (Autoría propia).*

#### 4.1.9 AGARRE DE TORNILLOS

El ensayo de agarre consiste en someter diferentes tipos de tornillos a fuerza axial con el objetivo de determinar el procedimiento de perforación, el tipo de tornillo recomendado y la cantidad de fuerza que resiste.

Para el ensayo se utilizó tres tipo diferentes de tornillos, los cuales poseen diámetros diferentes y pasos diferentes, algunos comúnmente utilizados en concreto y otros en madera; a cada cabeza de tornillo se le colocó un dispositivo que permite colocar diferentes pesos para ir midiendo el comportamiento del elemento hasta su falla.



*Ilustración 35: Prueba agarre de tornillo (Autoría propia).*

##### 4.1.9.1 Resultados Preliminares:

El material superficial resulta óptimo para la perforación y colocación de tornillos, sin embargo para la perforación se debe primero generar una pequeña perforación con taladro con el fin de generar un diámetro inicial. Los resultados con los tres distintos tipos de tornillos fueron:

- Tornillos de cabeza redonda de diámetro 5/32 in o 4mm: soportó las **80lb** de tensión.
- Tornillo de cabeza avellanada de diámetro 3/16in o 4,7mm: soportó las **80Lb** de tensión.
- Cabeza avellanada de 1/8in o 3,2mm: soportó **60Lb** de tensión.



*Ilustración 36: Ensayo de agarre de tornillos (Autoría propia).*

#### **4.1.10 RESISTENCIA AL FUEGO Y TRANSFERENCIA DE CALOR POR LLAMA**

La prueba de resistencia al fuego consiste en someter el elemento a una llama controlada con el objetivo de determinar el tiempo que se demora en encenderse y el comportamiento pos-encendido del elemento. A su vez se determina la transferencia de temperatura que presenta el elemento al estar sometido a la llama por un periodo de tiempo. Para la realización de este ensayo se tomaron dos probetas de muestra, la primera fue llevada al punto límite de resistencia de la llama;

la segunda fue analizada por transferencia de calor. Para esto se utilizó un soplete y un termómetro digital por sensor laser.



*Ilustración 37: Prueba resistencia a llama (Autoría propia).*

#### **4.1.10.1 Resultados Preliminares:**

Las láminas en fibra de vidrio soportan la temperatura sin generar derretimiento, ablandamiento superficial ni degradación hasta las 220°C, luego de sobrepasar esta temperatura empieza un proceso de degradación parcial del material hasta el punto de ignición a los 300°C; sin embargo al momento de generar ignición y retirar la llama se auto-extingue al transcurrir 6 segundos.

La temperatura no se transfiere homogéneamente en la superficie del componente, esto quiere decir que donde apunta la llama del soplete presenta temperaturas de 220°C, mientras que las áreas contiguas presentan temperaturas de 110°C hasta 60°C a una distancia no más de 50mm.

La transferencia de calor por llama no es evidente debido a que la placa posterior de fibra no presentó ningún incremento de temperatura en todo el tiempo de exposición continua a 220°C (10 min), permaneciendo fría al tacto en 30°C (Temperatura ambiente actual).

## **4.2 CÁLCULO TEÓRICOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO Y TÉRMICO.**

Debido a las dificultades para realizar pruebas de carácter técnico para determinar las propiedades acústicas y para el dimensionamiento térmico, se establecieron parámetros teóricos con el objetivo de corroborar o pre-determinar y conocer las propiedades del compuesto.

### **4.2.1 CÁLCULO DE AISLAMIENTO ACÚSTICO.**

Una onda es la propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio, como puede ser la densidad, la presión, el campo eléctrico o el campo magnético, a través del mismo, esto implica el transporte de energía sin el transporte de materia. Las características de una onda están definidas por:

- *Amplitud:* Es la distancia vertical entre una cresta o un valle y el punto medio de la onda.
- *Elongación:* Distancia perpendicular entre un punto de la onda y el punto de equilibrio.
- *Cresta:* Es el punto de máxima elongación o máxima amplitud de onda.
- *Valle:* Es el punto mínima elongación o mínima amplitud de onda.
- *Ciclo:* Es una oscilación, es decir un viaje completo de ida y vuelta.



- *Onda Transversal:* Es aquella en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, entre ellas se encuentran las ondas en una cuerda y las ondas electromagnéticas.
- *Onda Longitudinal:* Es aquella donde las vibraciones son paralelas a la dirección de propagación de la onda, por ejemplo las ondas sonoras. Las cuales son nuestro caso de estudio.

Toda onda puede experimentar los siguientes fenómenos:

- *Difracción:* Sucede cuando una onda se impacta contra la superficie de un objeto, donde deja de ir en línea recta para rodear el objeto.
- *Reflexión:* Sucede cuando una onda se encuentra con un medio que no puede atravesar y cambia de dirección.
- *Refracción:* Sucede cuando una onda cambia su dirección en cuanto entra en un nuevo medio, donde también cambia su velocidad.
- *Efecto Doppler:* Es un efecto debido al movimiento relativo de una fuente emisora de las ondas y el receptor.
- *Interferencia:* Ocurre cuando dos ondas al encontrarse en el mismo punto del espacio se combinan.
- *Onda de choque:* Ocurre cuando varias ondas que viajan en un medio se superponen y forman un cono.

Algunos ejemplos de ondas son, las olas, ondas de radio, microondas, luz visible, radiación electromagnética, ondas sísmicas, ondas sonoras.

#### 4.2.1.1 **Energía de ondas sonoras:**

Una onda sonora es una onda mecánica, es decir, necesita de un medio elástico para propagarse de forma esférica debido a que sus frentes de onda son esferas concéntricas que salen de la fuente de perturbación expandiéndose en todas las direcciones, estas ondas generan una variación a sus alrededores de presión o densidad, la cual el oído humano la interpreta como sonido. Dicha presión o cambio de presión genera en el medio un cambio de la energía.

Las ondas sonoras tienen las siguientes características:

- **Tono:** Se relaciona con la frecuencia, es la que nos permite distinguir sonidos graves de sonidos agudos.
  - **Sensación sonora aguda:** es la que procede de focos sonoros que vibran a frecuencias muy elevadas
  - **Sensación sonora grave:** es la que procede de focos sonoros que vibran a frecuencias bajas.
- **Timbre:** Está relacionado con los armónicos incluidos en la onda, cualidad por la cual podemos distinguir dos sonidos de igual intensidad e igual tono, que han sido emitidos por focos sonoros diferentes.

#### 4.2.1.2 **Presión acústica:**

La presión acústica se define como la diferencia de la presión instantánea y la presión atmosférica estática. El valor instantáneo de presión se define como:

$$P(t) = P_0 * \text{Sen}(w * t)$$

Valor medio de la presión:

$$P_{media} = \frac{1}{2\pi} * \int_0^{2\pi} p_0^2 * \text{Sen}(w * t) dt = 0$$

**Dónde:**

$P(t)$  Presión instantánea

$P_0$  Presión máxima

$w$  Frecuencia angular

$t$  Tiempo

Estos valores de presión, instantánea y media, no son los más adecuados para caracterizar el comportamiento de la onda, debido a la variación del tiempo, por otro lado, tenemos un valor promedio, el cual sería más adecuado para caracterizar la onda y viene dado por la expresión del valor eficaz (RMS root mean square).

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T p^2(t) dt}$$

#### 4.2.1.3 Nivel de presión acústica:

Determina la intensidad de sonido que genera una presión sonora, se suele usar el decibelio (dB) para medir dicha intensidad, debido que el espectro auditivo o campo tonal se encuentra en un rango muy amplio, que va desde 20 micropascales hasta los 200 pascales.

El decibelio es una escala logarítmica, y se usa debido que el oído percibe el sonido de igual forma, entonces para conocer el valor de una presión sonora de interés en decibeles se usa la siguiente fórmula:

$$L_p = 10 * \log \left[ \frac{P_{rms}}{P_0} \right]^2$$

*Dónde:*

$L_p$  Nivel de presión acústica en decibeles

$P_{rms}$  Valor eficaz de la presión acústica en pascales

$P_0$  Presión de referencia (20 micro pascales)

$$P_0 = 20 * 10^{-6} Pa$$

Como la escala de dB es una escala logarítmica, no se puede sumar aritméticamente dos niveles en dB.

Teniendo dos niveles de presión acústica  $L_{p1}$  y  $L_{p2}$  dB

$$L_{p1} = 10 * \log \left[ \frac{P1_{rms}}{P_0} \right]^2 \qquad L_{p2} = 10 * \log \left[ \frac{P2_{rms}}{P_0} \right]^2$$

Lo que es igual a:

$$P1_{rms}^2 = P_0^2 * 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \qquad P2_{rms}^2 = P_0^2 * 10^{\frac{L_{p2}}{10}}$$

Entonces la suma sería:

$$PT_{rms}^2 = P1_{rms}^2 + P2_{rms}^2$$

$$PT_{rms}^2 = P_0^2 * \left[ 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right]$$

El nivel de presión queda de la siguiente forma:

$$L_T = 10 * \log \left[ \frac{PT_{rms}}{P_0} \right]^2 \qquad L_T = 10 * \log \left[ 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right]$$

Tabla 7: Valores de niveles de presión acústica representados en nivel acústico.

Presión acústica ( $\mu\text{Pa}$ )	Nivel de presión (dB)
200000000	140
20000000	120
2000000	100
200000	80
20000	60
2000	40
200	20
20	0

#### 4.2.2 INTENSIDAD ACÚSTICA O SONORA

Físicamente es la energía que atraviesa por segundo la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

$$I = \frac{p^2}{\rho * c} * \cos\varphi$$

*Dónde:*

P es la presión

$\rho$  Es la densidad del medio

c Es la velocidad del sonido en el medio

$\varphi$  Es el ángulo de fase entre la velocidad y la presión

Si la velocidad es perpendicular a la presión, es decir  $\varphi = 90^\circ$ , la intensidad es nula

### 4.2.3 NIVEL DE INTENSIDAD ACÚSTICA

Este nivel va a depender de una intensidad de referencia, es decir va a ser una intensidad relativa a otra, la cual es la que hace referencia al umbral auditivo.

Está definido por la ecuación:

$$L_I = 10 * \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Donde

$L_I$  Es el nivel de intensidad acústica

$I$  Es la intensidad a considerar

$I_0$  Es la intensidad de referencia (umbral auditivo)

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

### 4.2.4 ENERGÍA DE INCIDENCIA, DE REFLEXIÓN Y DE ABSORCIÓN

- *Energía de incidencia:* Cuando una onda se encuentra con un obstáculo, un objeto, la energía que lleva la onda incide en él, puede ser reflejada totalmente, absorbida totalmente o ser reflejada una parte y la otra absorbida.
- *Energía de reflexión:* Es la energía que al chocar con un objeto rebota, es decir no atraviesa el material de dicho objeto. El coeficiente de reflexión es:

$$R = \frac{E_r}{E_i}$$

- *Energía de absorción:* Es la energía que al chocar con un objeto lo atraviesa, una parte se disipa en el material como calor por fricción y el resto se transmite al otro entorno. El coeficiente de absorción es:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = \frac{E_i - E_r}{E_i} = 1 - R$$

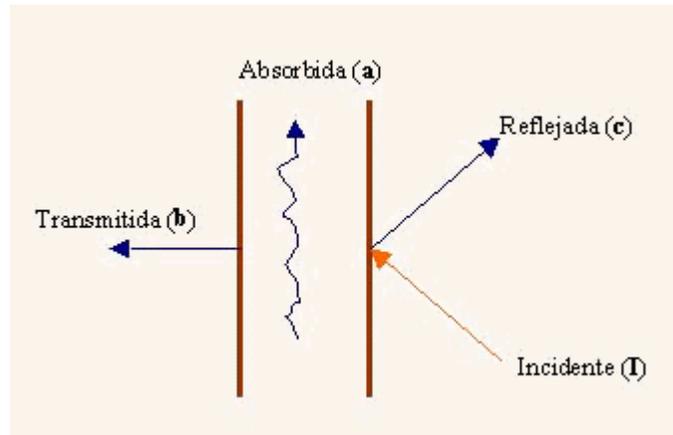


Ilustración 39: Diagrama de energía sonora incidente, reflejada, absorbida y transmitida.

#### 4.2.5 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El objetivo de acondicionar acústicamente un recinto (cerrado o al aire libre), es lograr que el sonido que proviene de una o varias fuentes sea irradiado en todas las direcciones sea aproximadamente constante, y dependiendo del recinto, se va a querer atenuar el sonido o amplificarlo. Para nuestro caso se va a querer mantener el nivel de presión sonora en las proximidades de 60 dB que es donde se encuentra la comodidad auditiva.

- *Aislamiento debido a la Reflexión:* Teniendo una pared simple, el índice de aislamiento acústico de dicha pared, puede ser calculado usando la ley de masas:

$$R = 16.6 * \log(M) + 2 \quad \text{si } M \leq 150 \text{ Kg/m}^2$$

$$R = 36.5 * \log(M) - 41.5 \quad \text{si } M > 150 \text{ Kg/m}^2$$

Siendo  $M$  la masa por unidad de superficie ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ) del material al que se le quiera conocer el aislamiento acústico

Si se tiene más de un material, se tendría un índice global de aislamiento:

$$R_g = 10 * \log \left( \frac{\sum S_i}{\sum S_i / 10^{\frac{R_i}{10}}} \right) (dB)$$

*Donde:*

$R_i$  El aislamiento de cada material

$S_i$  La superficie correspondiente a cada material

- **Absorción:** Es la cantidad de energía extraída del campo acústico, cuando la onda sonora atraviesa un medio determinado. Puede calcularse de la siguiente manera:

$$A_f = \alpha_f * s \quad \text{ó} \quad A = \alpha_m * s$$

*Dónde:*

$A_f$  Es la absorción para la frecuencia  $f$ , está dada en  $\text{m}^2$

$A$  Es la absorción media, dada en  $\text{m}^2$

$\alpha_f$  Es el coeficiente de absorción del material para la frecuencia  $f$

$\alpha_m$  Es el coeficiente medio de absorción

$s$  Es la superficie del material, dada en  $\text{m}^2$

Para múltiples medios con diferentes superficies:

$$A_l = \sum_{i=1}^n (\alpha_i * s_i) (\text{m}^2)$$

- *Reverberación:* Fenómeno que ocurre debido a la reflexión de las ondas sonoras en los límites de un local, el cual es una propagación audible de ruido en un tiempo donde la fuente no está emitiendo ningún ruido. Si una superficie es poco absorbente el sonido se apagará lentamente y viceversa. Su efecto se mide por el tiempo de reverberación, el cual es el tiempo que se toma reducir la presión acústica en 60 dB, luego de ser detenida la emisión de la fuente sonora.

Esta dada por la ecuación de Norris-Eyring:

$$T = \frac{0.163 * V}{-s * \ln(1 - \alpha_m) + 4 * m * V}$$

*Dónde:*

$T$  Es el tiempo de reverberación en segundos, s

$V$  Es el volumen del local o recinto en  $m^3$

$s$  La superficie del local en  $m^2$

$\alpha_m$  Es el coeficiente medio de absorción del local

Si el coeficiente  $\alpha_m < 0.2$  se puede aproximar como:

$$T = \frac{0.163 * V}{A}$$

Existe una forma de conocer el cambio o la reducción de niveles sonoros de un local, antes y después de un acondicionamiento acústico, por medio de las ecuaciones:

$$\Delta dB = 10 * \log \frac{T_0}{T_1}$$

$$\Delta dB = 10 * \log \frac{A_1}{A_0}$$

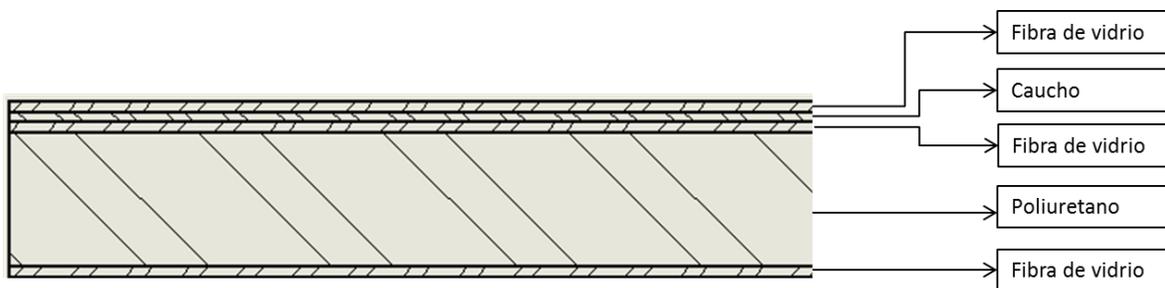
*Dónde:*

$T_0$  Y  $T_1$  son los tiempos de reverberación antes y después del tratamiento acústico

$A_0$  Y  $A_1$  la absorción del local antes y después del tratamiento acústico

#### 4.2.6 CASO DE ESTUDIO

Suponiendo una pared compuesta (tipo sandwich) de fibra de vidrio, espuma de poliuretano y caucho en la siguiente disposición



*Ilustración 40: Diagrama de capas del piso (Autoría propia).*

Donde el espesor de la fibra de vidrio es de 5 mm, el espesor del caucho es 5 mm, y el espesor del poliuretano es 50 mm.

Ahora, el cálculo del acondicionamiento acústico (Aislamiento y absorción del material) se procede de la siguiente forma:

- Cálculo de aislamiento por reflexión:

Para el cálculo de la reflexión o el aislamiento por reflexión tenemos las siguientes formulas:

$$R = 16.6 * \log(M) + 2 \quad \text{si } M \leq 150 \text{ Kg/m}^2$$

$$R = 36.5 * \log(M) - 41.5 \quad \text{si } M > 150 \text{ Kg/m}^2$$

Dónde M se calcula multiplicando la densidad del material por el espesor

$$M = \rho * t \frac{Kg}{m^2}$$

Tabla 8: propiedades para el cálculo de la reflexión

<b>Material</b>	<b>Concreto</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	120,00
		Coefficientes de absorción promedio	0,02
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
	<b>Fibra de Vidrio</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	12,80
		Coefficientes de absorción promedio (5mm)	0,13
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
	<b>Poliuretano</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	0,68
		Coefficientes de absorción promedio (50mm)	0,40
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
	<b>Caucho alftico</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	5,20
		Coefficientes de absorción promedio (5mm)	0,06
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00

$$R_C = 16.6 * \log(120) + 2$$

$$R_C = 36.51 \text{ dB}$$

$$R_F = 16.6 * \log(12.8) + 2$$

$$R_F = 20.38 \text{ dB}$$

$$R_P = 16.6 * \log(0.675) + 2$$

$$R_P = 0 \text{ dB}$$

$$R_{CA} = 16.6 * \log(5.2) + 2$$

$$R_{CA} = 13.89 \text{ dB}$$

- Cálculo de aislamiento por absorción:

Para el cálculo de la absorción tenemos la siguiente formula:

$$\Delta dB = 10 * \log \frac{A_1}{A_0}$$

Sirve para comparar la absorción de un material con respecto a otro, en este caso se realizará con respecto al concreto.

Tabla 9: Tabla propiedades para el cálculo de la absorción.

<b>Material</b>	<b>Concreto</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	120,00
		Coeficientes de absorción promedio	0,02
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
		Decibeles absorbidos (prom)	<b>0,00</b>
	<b>Fibra de Vidrio</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	12,80
		Coeficientes de absorción promedio (5mm)	0,13
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
		Decibeles absorbidos (prom)	<b>0,00</b>
	<b>Poliuretano</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	0,68
		Coeficientes de absorción promedio (50mm)	0,40
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
		Decibeles absorbidos (prom)	<b>13,01</b>
	<b>Caucho alftico</b>	Densidad área (50mm espesor) [Kg/m <sup>2</sup> ]	5,20
		Coeficientes de absorción promedio (5mm)	0,06
		Área de medición [m <sup>2</sup> ]	1,00
		Decibeles absorbidos (prom)	<b>4,77</b>

La absorción teórico del material es de:

$$L_g = 6.72 + 4.77 \text{ dB} = 11.49 \text{ dB}$$

El aislamiento total está definido por:

$$LI = 34.27 + 11.49 = 45.76 \text{ dB}$$

#### 4.2.6.1 Conclusiones preliminares:

A pesar de que existen diferencia considerables entre métodos de cálculo, principalmente con la absorción de los materiales que no son comúnmente utilizados

en la construcción como la fibra de vidrio y la resina de poliuretano, se podría encontrar un valor de 45 dB siendo un valor aceptable para un piso.

#### 4.2.7 CÁLCULO TEÓRICO DEL AISLAMIENTO TÉRMICO

Para el cálculo teórico de la capacidad de transferencia de calor del material se evaluaron las tres condiciones básicas de todo sistema: conducción, convección y reflexión.

##### **Conducción:**

La forma en la que se calcula la conducción de calor que ocurre en un material se expresa en la siguiente fórmula.

$$\dot{Q}_{Cond} = k * A * \frac{T_1 - T_2}{L}$$

Donde:

$k$  Constante de conductividad térmica del material.

$A$  Área de la superficie de contacto [m<sup>2</sup>].

$T_1$  Temperatura alta, [°C].

$T_2$  Temperatura baja, [°C].

$L$  Espesor de la placa o pared [m].

##### **Convección:**

La forma en la que se calcula la convección de calor que ocurre entre un material sólido y un fluido se expresa en la siguiente fórmula.

$$\dot{Q}_{Conv} = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

*Donde:*

$h$  Constante de convección térmica del fluido

$A_s$  Área de la superficie de contacto [m<sup>2</sup>].

$T_s$  Temperatura superficial [°C].

$T_\infty$  Temperatura del ambiente [°C]

***Radiación:***

La forma en la que se calcula la convección de calor que ocurre entre un material sólido y un fluido se expresa en la siguiente fórmula.

$$\dot{Q}_{Rad} = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{alred}^4)$$

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s + T_{alred})$$

$$\dot{Q}_{Rad,pared} = h_{rad} * A_s * (T_s - T_{alred})$$

*Donde:*

$\varepsilon$  Emisividad del material

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann

$A_s$  Área de la superficie de contacto [m<sup>2</sup>]

$T_s$  Temperatura superficial [K]

$T_{alred}$  Temperatura del ambiente [K]

Con las fórmulas anteriores podemos encontrar individualmente la transferencia de calor que existe en el material debido a los tres métodos; pero en circunstancias

reales, al menos dos de dichos métodos, para calcular la transferencia total existe un concepto con el cual se pueden sumar el valor obtenido en cada método, este concepto es el de resistencia térmica, donde el flujo de energía térmica se compara con el flujo de energía eléctrica de la siguiente forma:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_e} \quad ; \quad \dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{Termica}}$$

$$I = \frac{\Delta V}{R_e} \quad ; \quad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{Termica}}$$

Donde:

$I$  y  $\dot{Q}$  Flujo de energía eléctrica y térmica respectivamente.

$\Delta V$  y  $\Delta T$  Caída de voltaje y de temperatura respectivamente.

$R_e$  y  $R_{Termica}$  Resistencia al flujo de energía eléctrica y térmica respectivamente

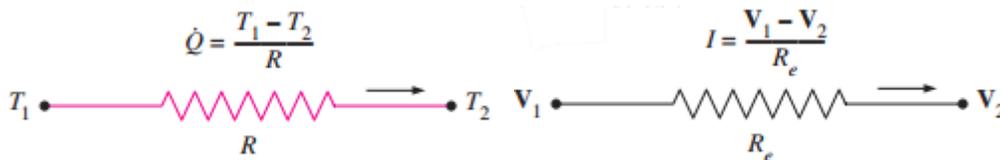


Ilustración 41: A la izquierda flujo de calor y a la derecha flujo de electricidad.

Las ecuaciones de transferencia de calor aplicando el concepto de resistencia quedan así:

$$\dot{Q}_{Cond} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}}$$

$$R_{pared} = \frac{L}{k * A}$$

Suponiendo un material que está expuesto en una de sus caras al ambiente y la cara opuesta se encuentra confinada en un recinto, la transferencia total de calor se calcula teniendo en cuenta los tres métodos, y la forma en la que esos métodos se suman se define:

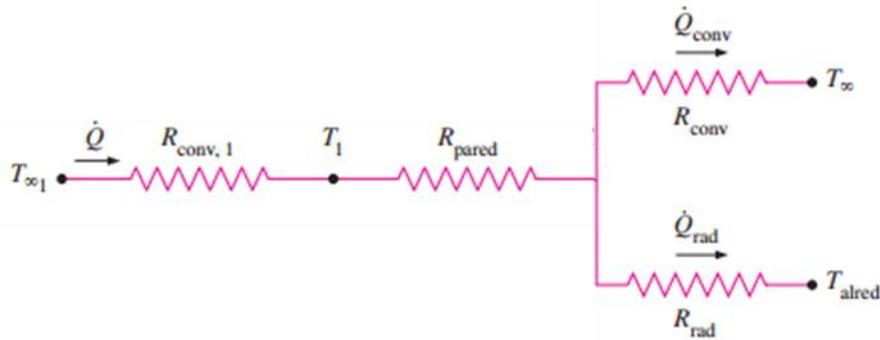


Ilustración 42: Conexión de resistencias térmicas (Autoría propia).

Y la ecuación correspondiente a la figura anterior sería:

$$\dot{Q} = h_{conv,2} * A_s * (T_s - T_{\infty 1}) + k * A * \frac{T_1 - T_2}{L} + h_{combinado} * A_s * (T_s - T_{\infty})$$

$$h_{combinado} = h_{conv,1} + h_{rad}$$

#### 4.2.8 CASO TEÓRICO

Se tiene una placa de material compuesto dispuesto de la siguiente manera:

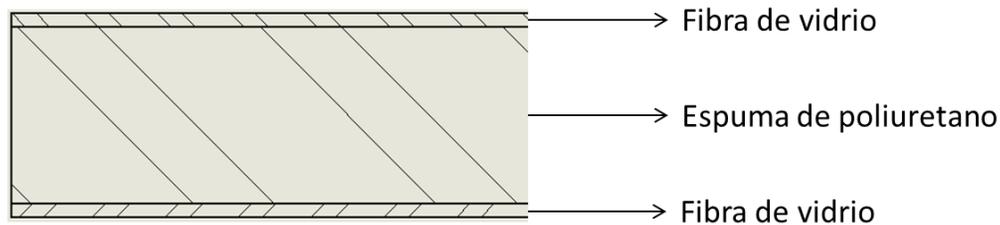


Ilustración 43 - Configuración piso modular compuesto (Autoría propia).

La cual se encuentra expuesta al ambiente en una de sus caras y la otra se encuentra confinada en un recinto; la placa y el entorno que la rodea tienen las siguientes características:

*Tabla 10: Propiedades térmicas de los materiales usados.*

Material	Coeficiente de conducción [W/mK]		Coeficiente de convección [W/m <sup>2</sup> K]		Emisividad	Coeficiente de radiación [K/W]	Espesor [m]	Área [m <sup>2</sup> ]
Fibra de vidrio	0.03	0.07	N/A		0.85	6.356326	0.005	1
Espuma de poliuretano	0.032	0.035	N/A		N/A	N/A	0.055	1
aire	N/A		5.00	25.00	N/A	N/A	N/A	N/A

*Tabla 11: Resistencia térmica de los materiales usados.*

Material	Resistencia Conducción [K/W]		Resistencia Convección [K/W]		Resistencia Combinada [K/W]
Fibra de vidrio	0.166667	0.071429	N/A		0.088057
Espuma de poliuretano	1.718750	1.571429	N/A		N/A
aire	N/A		0.20	0.04	N/A

*Tabla 12: Características térmicas del entorno.*

Temperatura	Grados Celsius [°C]	Grados Kelvin [K]
Alrededor 1	35	308
Alrededor 2	22	295

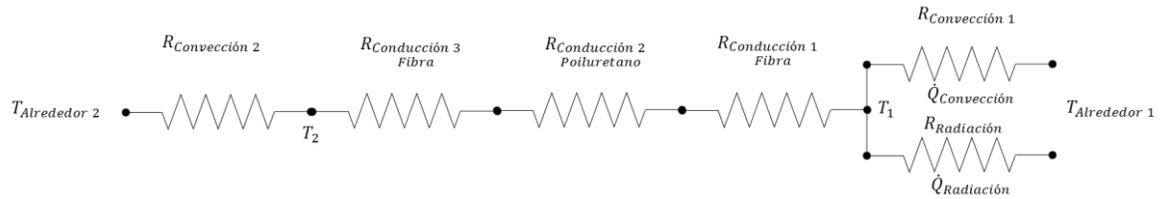


Ilustración 44 – Diagrama de resistencias térmicas (Autoría propia).

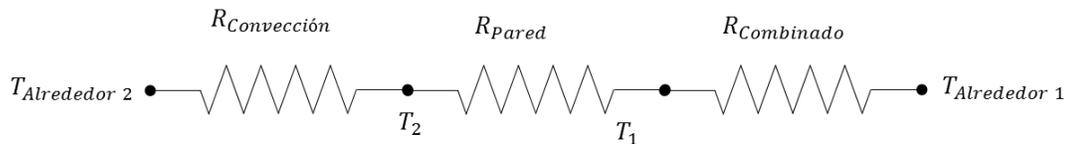


Ilustración 45 – Diagrama simplificado de resistencias térmicas (Autoría propia).

La ecuación del comportamiento térmico queda entonces como:

$$R_{Pared} = \frac{L}{k_1 * A} + \frac{L}{k_2 * A} + \frac{L}{k_1 * A}$$

$$R_{Pared} = \frac{0.005}{0.03 * 1} + \frac{0.055}{0.032 * 1} + \frac{0.005}{0.03 * 1} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Pared} = 2.0520833 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Convección} = \frac{1}{h_{conv} * A} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Convección} = \frac{1}{5 * 1} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Convección} = 0.2 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Combinado} = \frac{1}{h_{combinado} * A} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Combinado} = \frac{1}{(5 + 6.356326) * 1} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Combinado} = 0.088057 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{T_{alred\ 1} - T_{alred\ 2}}{R_{Convección} + R_{Pared} + R_{Combinado}}$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{308 - 295}{0.2 + 2.0520833 + 0.088057} W$$

$$\dot{Q}_{Total} = 5.5552 W$$

Siendo este valor el flujo total de calor transferido desde el exterior hacia el interior, o dicho de otra forma, la cantidad de energía térmica que se transfiere desde el exterior hacia el interior en un segundo.

Para usos comparativos se calculará el flujo de calor que se tendría en una placa de concreto y de ladrillo, siendo esto lo mas usado en construcción.

$$R_{hormigon} = \frac{L}{k * A}$$

$$R_{hormigon} = \frac{0.065}{1.4 * 1} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{hormigon} = 0.04642857 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Convección} = 0.2 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Combinado} = 0.11301477 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{T_{alred\ 1} - T_{alred\ 2}}{R_{Convección} + R_{hormigon} + R_{Combinado}}$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{308 - 295}{0.2 + 0.04642857 + 0.11301477} W$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{308 - 295}{0.35944334} W$$

$$\dot{Q}_{Total} = 36.167035 W$$

$$R_{ladrillo} = \frac{L}{k * A}$$

$$R_{ladrillo} = \frac{0.065}{0.6 * 1} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{ladrillo} = 0.108333 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Convección} = 0.2 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$R_{Combinado} = 0.09043498 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{T_{alred 1} - T_{alred 2}}{R_{Convección} + R_{ladrillo} + R_{Combinado}}$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{308 - 295}{0.2 + 0.04642857 + 0.09043498} W$$

$$\dot{Q}_{Total} = \frac{308 - 295}{0.33686355} W$$

$$\dot{Q}_{Total} = 38.591293 W$$

#### 4.2.8.1 Resultados preliminares:

Existe una eficiencia teórica por parte del material compuesto de 651% respecto al concreto y en un 695% respecto al ladrillo; esto quiere decir que evaluando un material del mismo espesor, el compuesto con fibra de vidrio tiene menos transferencia de calor.

#### 4.2.9 EXPERIMENTACIÓN

Se han tomado tres muestras de placas de material compuesto con diferentes configuraciones:

- Fibra de vidrio – Espuma de poliuretano (baja densidad) – Fibra de vidrio
- Fibra de vidrio – Espuma de poliuretano (alta densidad) y fibra de vidrio – Fibra de vidrio
- Fibra de vidrio – Espuma de poliuretano (baja densidad), fibra de vidrio y madera – Fibra de vidrio

Las cuales se han expuesto a dos tipos de pruebas para conocer la transferencia de calor del material.

- Placa expuesta a radiación solar (calentamiento y enfriamiento)
- Placa expuesta a llama directa (calentamiento)

Los puntos de medición y los datos obtenidos para las pruebas fueron:



*Ilustración 46 – Ubicación de las medidas de temperatura hechas sobre las placas (Autoría propia).*

- Placa expuesta a radiación solar – Calentamiento.

Tabla 13: Tabla con las temperaturas obtenidas en los cinco puntos de la superficie expuesta a radiación de las placas de espuma de alta densidad, baja densidad y baja densidad con madera.

N° Medición	tiempo (Minutos)	TEMPERATURA °C														
		Espuma de poliuretano de alta densidad					Espuma de poliuretano de baja densidad					Espuma de poliuretano de baja densidad con madera				
		Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5
1	0	35.6	36.4	38.6	38	39.4	51.8	52	52.4	54.2	61.6	37.8	35.2	37.6	36.8	36.4
2	7	40.8	41.4	44.4	42.8	43.2	59.4	56.2	61.4	57.6	66.8	38.6	37.2	38.8	39.2	37
3	14	42.6	41.8	46.6	44.6	45.4	53.8	61	66.6	63	68.4	39.4	39.4	39.6	39.6	37.8
4	21	41.6	43.8	47.8	46.2	46.2	64.6	56.8	62.8	66.2	68.2	39.8	39.8	41	41.6	39.6
5	28	43.2	44.6	48.4	45.6	45.6	64.4	60.6	63	64.4	68	41.8	42	41.2	41.2	39.6
6	35	44.2	43.8	47.8	45.2	46.4	55.8	62.8	60.8	52.4	66.4	41.4	39.4	40.6	38.6	39.6
7	42	43.4	43.2	47	42.8	43.6	55.4	47.2	55.4	46.8	60.4	40	38.6	38.4	38.6	38.8
8	49	43	43.2	47.2	44.4	45.2	54.4	55	61.2	55.4	63.8	40.4	39.4	38	36.8	37.8
9	56	42.6	43.2	46.4	43.8	45.8	59.4	54.8	59.8	56.6	67.2	42.2	41.6	41.8	41	42

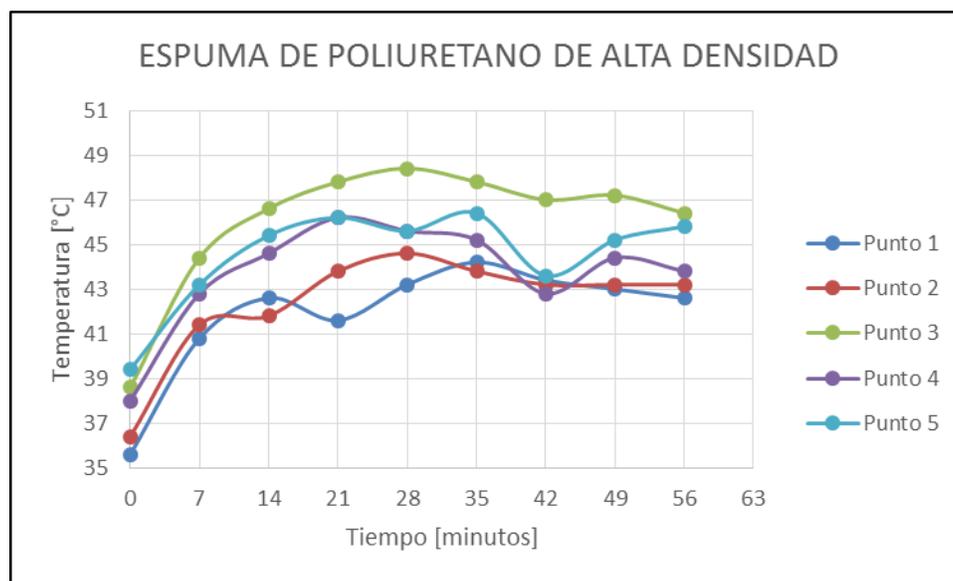
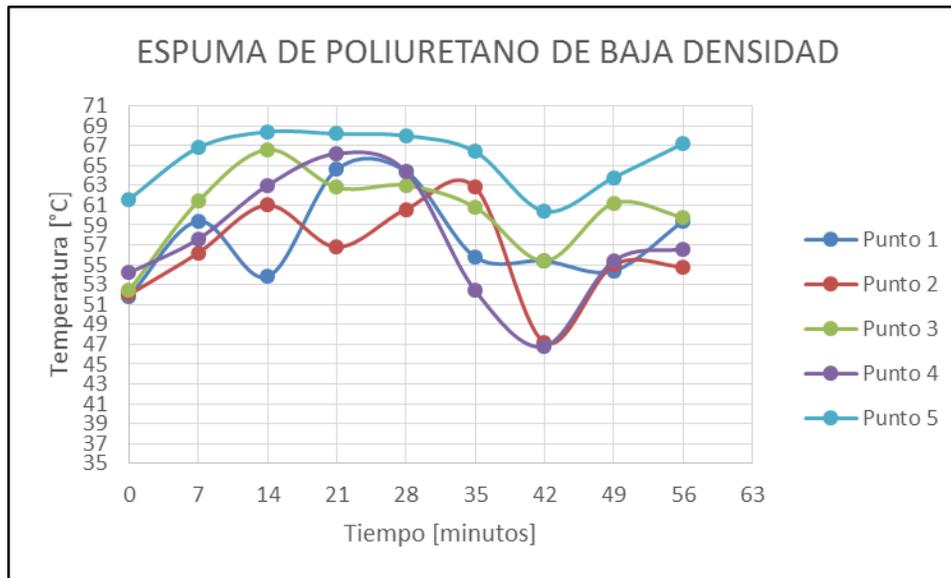
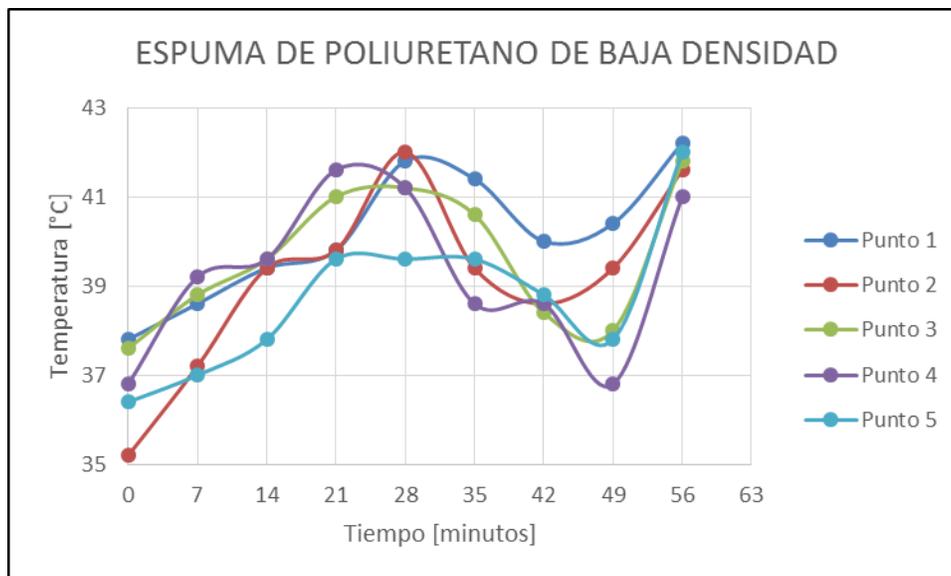


Ilustración 47 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia).



*Ilustración 48 - Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).*



*Ilustración 49 - Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad con madera (Autoría propia).*

Las temperaturas obtenidas en los puntos 1 y 2 se ven afectadas debido a que en la sección transversal de la placa correspondiente a esas ubicaciones no tenían tapas, es decir la espuma y la fibra de vidrio interna estaban expuestas al ambiente.

Las gráficas anteriores muestran el comportamiento térmico de cada placa, evaluada en los puntos seleccionados, cuando son expuestas a la radiación solar, se observan varios saltos de temperatura, los cuales se pueden asociar a factores climáticos, como son nubes y flujo de aire inesperados.

- Placa expuesta a radiación solar – Calentamiento parte posterior.

Tabla 14: Tabla con las temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación para las placas de espuma de alta y baja densidad.

N° Medición	tiempo (Minutos)	TEMPERATURA °C									
		Espuma de poliuretano de alta densidad					Espuma de poliuretano de baja densidad				
		Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5
1	0	32.4	32.2	30.6	32.8	32.8	35.6	33.2	31.4	31.4	34.8
2	3	32.6	32.4	30.6	33.6	33.2	36.4	33.8	31.6	31.6	35.4
3	6	32.6	32.4	29.8	33.8	33	34.8	32.8	30.6	31.8	34.4
4	9	33.2	32.6	30.6	33.8	34.2	36.6	33.2	31.6	33.2	36.4
5	12	33.6	32.8	31.8	34.6	34.6	37	33.6	31.4	33.6	36.4
6	15	33.6	32.6	31.4	34.6	34.6	37.4	34.2	32.6	34	36.4
7	18	32.6	32.4	30.8	34.2	33.4	35.8	32.4	31.2	33.4	35.6
8	21	32.6	32.2	30	33.8	33.2	37.4	32.8	31.2	33.6	35.8
9	24	32.6	32.2	32.2	33.4	33.2	34.2	33.2	32	33.2	34.8
10	27	32	31.6	31.8	33.4	33.2	35.4	33.2	32.2	32.8	35
11	30	31.6	31.2	30.6	34.6	32.6	34.6	33.4	30.6	30.2	34.6

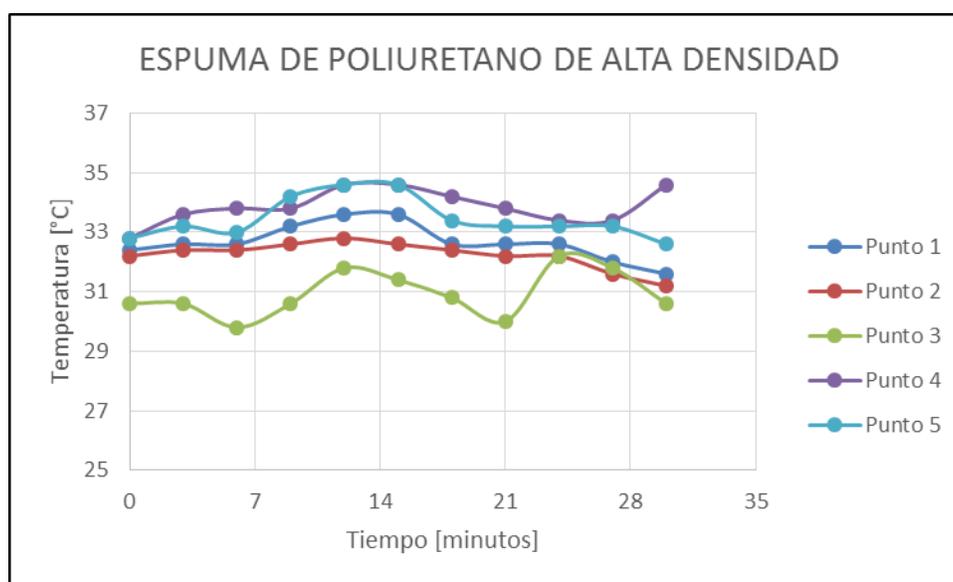
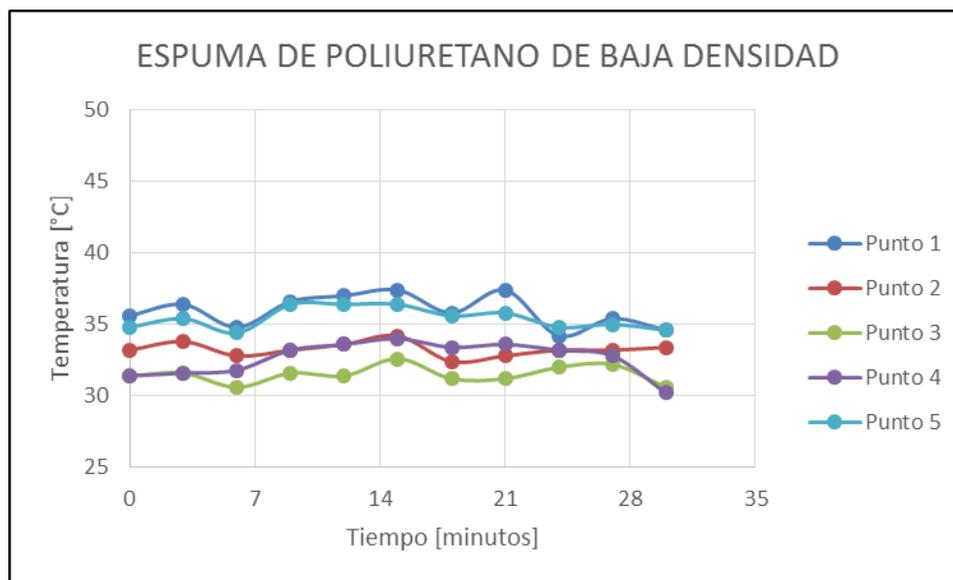


Ilustración 50 – Gráfica de temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia)

Las temperaturas obtenidas en los puntos 3 y 4 tienen ese tipo de comportamiento ya que en la sección transversal correspondiente a esas ubicaciones no tenían tapas, es decir la espuma y la fibra de vidrio interna estaban expuestas al ambiente.



*Ilustración 51 - Gráfica de temperaturas de la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).*

Las temperaturas obtenidas en los puntos 2, 3 y 4 tienen ese tipo de comportamiento ya que en la sección transversal correspondiente a esas ubicaciones no tenían tapas, es decir la espuma estaba expuesta al ambiente.

Estas gráficas muestran cómo se comportaron térmicamente las placas de espuma de poliuretano de baja y alta densidad en la superficie contraria a la que está expuesta a la radiación, las curvas que presentan las temperaturas más bajas, hacen referencia a los bordes que están descubiertos.

- Placa expuesta a radiación solar – Enfriamiento.

Tabla 15: Tabla con las temperaturas obtenidas en los cinco puntos de la superficie expuesta a la sombra de las placas de espuma de alta densidad, baja densidad y baja densidad con madera.

N° Medición	tiempo (Minutos)	TEMPERATURA °C														
		Espuma de poliuretano de alta densidad					Espuma de poliuretano de baja densidad					Espuma de poliuretano de baja densidad con madera				
		Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5
1	0	37.6	37.4	42.4	40.2	40.4	40.4	38	48.2	43.2	48.2	36	34.2	36.4	35.6	36.2
2	7	33	34.2	35.8	35.2	34.2	32.8	30.6	36.2	34	34.6	32.6	31	32.8	32.2	34
3	14	31.2	32.8	33.4	33	33	32.2	31.6	32	32	32	33.2	31.8	32.2	32	32.2
4	21	30.8	31.8	31.4	31.8	31.8	31.6	31	30.8	31.2	31	32.2	31.8	31.6	31.6	32.6
5	28	31	31.8	31.4	31.6	31.4	31.2	31.2	30.8	31	30.6	32	31.4	31.4	31.2	32
6	35	30.6	31.4	30.8	31.2	31	31	30.8	30.6	30.8	30.4	31.6	31.2	30.8	31	31.8
7	42	30.2	30.8	30.4	30.6	30.6	30.6	30.6	30.2	30.8	30.4	31.6	31.2	31.2	31	31.6
8	49	30.6	30.8	30.6	30.4	30.4	30.8	31.2	30.8	31.4	30.6	31.6	31	31.4	31	31.6
9	56	30.8	31.2	30.8	31	30.6	31.2	31.2	31	31.2	30.4	31.2	30.8	31.2	30.8	31.2

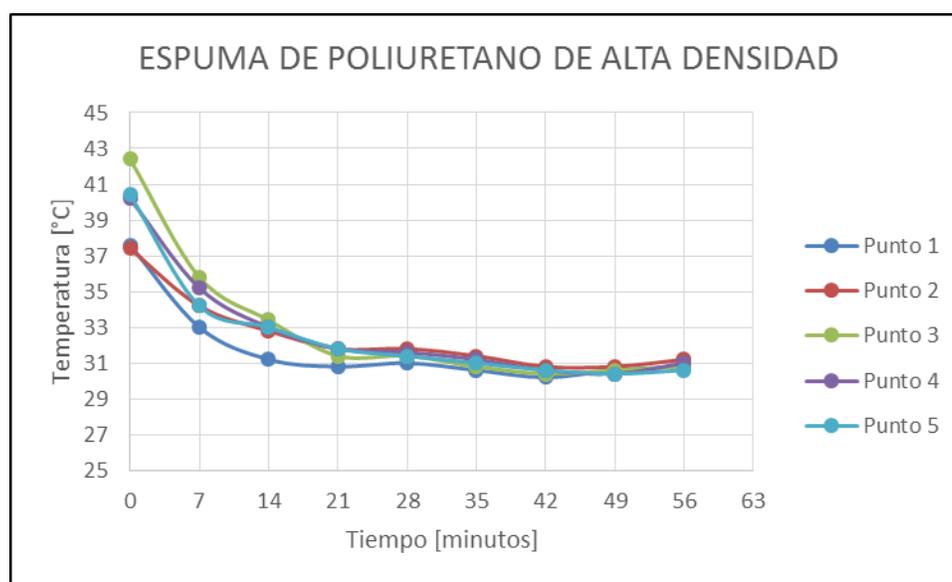
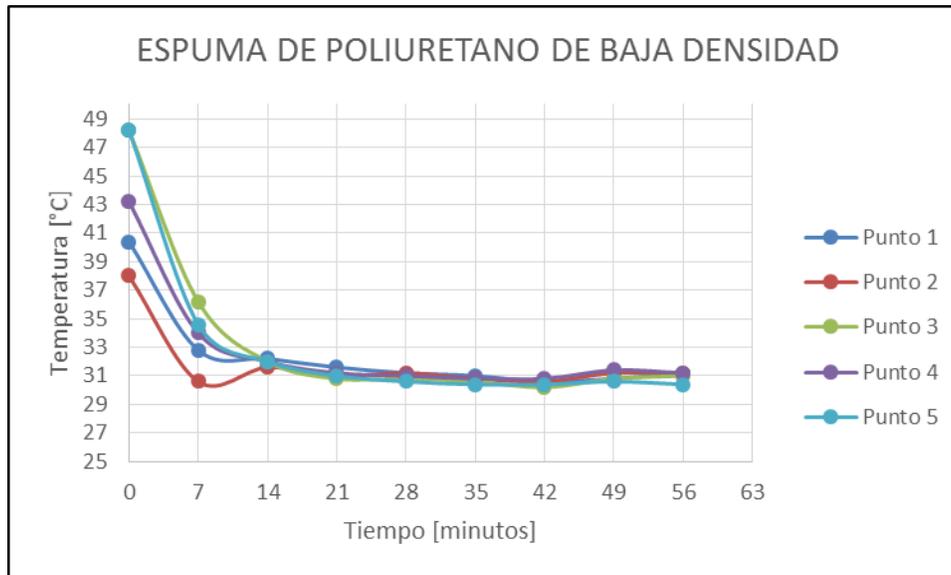
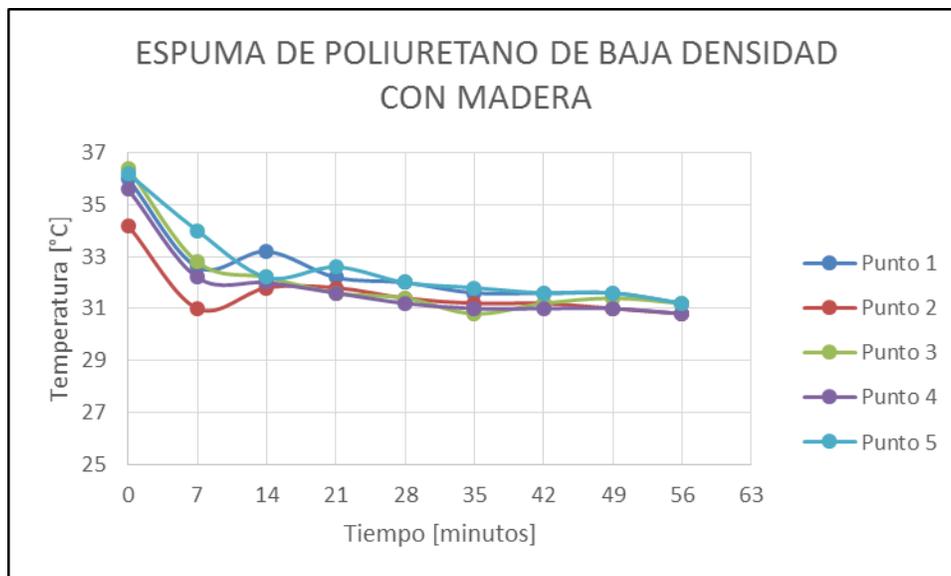


Ilustración 52 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de alta densidad (Autoría propia).

Las temperaturas obtenidas en los puntos 1 y 2 tienen ese tipo de comportamiento ya que en la sección transversal correspondiente a esas ubicaciones no tenían tapas, es decir la espuma y la fibra de vidrio interna estaban expuestas al ambiente.



*Ilustración 53 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de baja densidad (Autoría propia).*



*Ilustración 54 – Gráfica de temperaturas para la superficie expuesta a la sombra de la placa de espuma de baja densidad con madera (Autoría propia).*

Las temperaturas obtenidas en los puntos 1 y 2 tienen ese tipo de comportamiento ya que en la sección transversal correspondiente a esas ubicaciones no tenían tapas, es decir la espuma y la madera estaban expuestas al ambiente.

### **4.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES**

El compuesto posee buenas propiedades térmicas las cuales lo hace un buen aislante térmico, a comparación del concreto y del ladrillo, evita la entrada de flujo de calor dentro de la edificación haciendo de este material indicado para fachadas. A pesar de que las superficies se calientan relativamente rápido en comparación con otros materiales, también posee la capacidad de enfriarse en tiempos de 14 en sombra; esto quiere decir que no existirá acumulación de calor en las paredes y pisos luego de la exposición al sol, haciendo de estos sitios mucho más frescos y con un control de temperatura más adecuado. En términos de ahorro de energía, este material permite ahorrar energía de los aires acondicionados debido a las bajas pérdidas de flujo de calor. Es importante realizar relieves en las superficies en contacto con el agente de calor, ya que esto permite a generar distribuciones irregulares en la superficies y por lo tanto una disminución en la temperatura superficial.

El compuesto posee buenas propiedades acústicas y posee una buena resistencia mecánica. Se puede plantear la posibilidad de generar un sistema de piso que funciones como diafragma rígido debido a la resistencia que presentó. Sin embargo se recomienda realizar mejores ensayos para la validación de este tipo de piso.

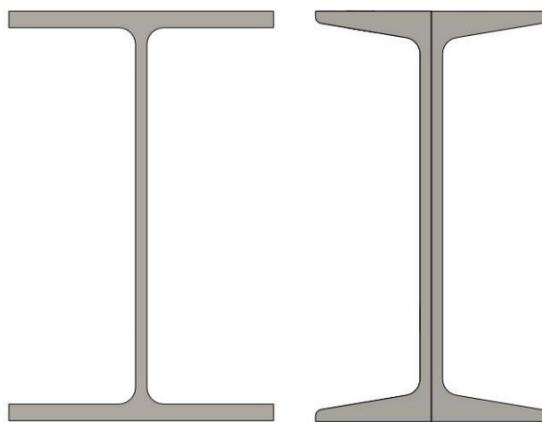
## 5 CONEXIONES ESPECIALES

### 5.1 CONEXIÓN DE VIGAS DE ENTREPISOS

La conexión de vigas de entrepisos se realiza utilizando unos perfiles en C. Al unir los entrepisos, la cara de unión de las dos vigas en C, se juntan y son unidas por medio de una conexión rígida. Esta conexión está determinada para soportar la flexión, torsión y cortante que se produce a lo largo de la viga.

Para el desarrollo de la conexión se planteó diferentes alternativas, las cuales evaluaba la versatilidad del ensamble, la economía y la simplicidad de esta conexión.

Uno de los inconvenientes de la conexión en ][, se presenta en la forma de unir los perfiles en C de tal forma que se comporten como un perfil en H bajo condiciones iguales de carga. Esta hipótesis se plantea con el objetivo de simplificar el modelo de cálculo y llegar a considerar una unión rígida uniforme.



*Ilustración 55: Perfiles en H y C (Autoría propia).*

Las propiedades de cada perfil se establecen de acuerdo a su material y a sus dimensiones generales. Para la evaluar estos criterios se realizaron simulaciones en elementos finitos, con el objetivo de determinar uniformidad entre los perfiles en C unidos espalda con espalda y una viga en uniforme en H dimensionalmente igual.

Para este desarrollo se realizaron y plantearon diferentes uniones estructurales con el fin de determinar la conexión con mejor comportamiento y uniformidad. La comparación se establece en base al comportamiento que se presenta en las vigas en H sometida a las mismas cargas.

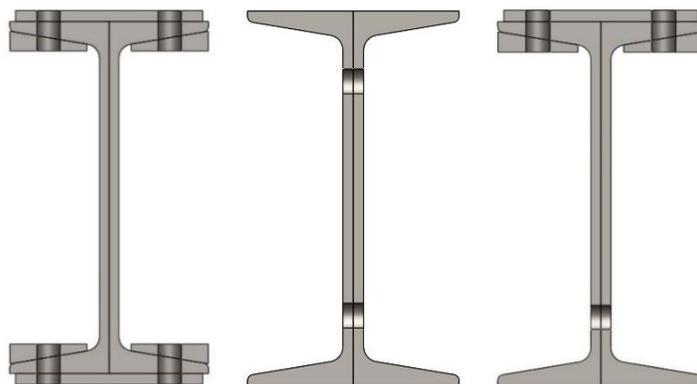
Para la unión estructural de los dos perfiles en C se plantean dos alternativas:

Alternativa 1: realizar dos perforaciones concéntricas a través de una platina y cada patín para unir mediante pernos estructurales, haciendo uso de arandelas biseladas.

Alternativa 2: realizar perforaciones concéntricas a través del alma de los perfiles, ubicadas muy cerca de los patines, para unir mediante pernos estructurales.

Entre los métodos de unión anteriores se excluyó la opción de fresar el peralte de los perfiles a través de la inclinación de sus alas para generar superficies de apoyo paralelas entre la cabeza del perno y la tuerca, debido a que esto reduce la inercia y la resistencia mecánica del perfil e incrementa los costos y el tiempo de fabricación. En su lugar se optó por utilizar arandelas biseladas normalizadas de acuerdo con la norma ASTM F436.

Ejecutando combinaciones entre los métodos anteriores para unir los patines superiores e inferiores con métodos diferentes o iguales, se obtienen las siguientes propuestas:



*Ilustración 56: Alternativas de conexión estructural de los perfiles en C (Autoría propia).*

La propuesta 1 consiste en la perforación de agujeros en la aleta a tensión y compresión, en estas perforaciones son entrelazadas por platinas que unen un perfil con el otro por medio de pernos de alta resistencia. Esta unión posee la limitación de requerir arandelas biseladas para contrarrestar el peralte interno que poseen las vigas o canales en C.

La propuesta 2 consiste en realizar solo perforaciones en el alma de los perfiles, esto con el objetivo de que estos sean unidos solo por fricción. La limitante radica en la posibilidad de reducción de la fuerza de fricción entre las espaldas debido a cargas apoyadas sobre la aleta.

La propuesta 3 se plante realizar una combinación de uniones en las cuales se diseña una conexión en el patín a compresión con arandelas biseladas y en el alma con perforación completa.

Para elegir entre las propuestas anteriores se realizan estudios con un perfil comercial de viga C8 x 11.5 con una longitud total de un metro, hecha de acero estructural ASTM A36. Las perforaciones están igualmente espaciadas a lo largo de la viga, con una distancia de 200 mm entre ellas.

*Características propias de la modelación:*

- Coeficiente de fricción: 0.2

Los conectores tipo perno se definen

- Tipo: estándar o refrentado con tuerca.
- Mismo diámetro de cabeza y tuerca.
- Material: acero aleado de la librería.

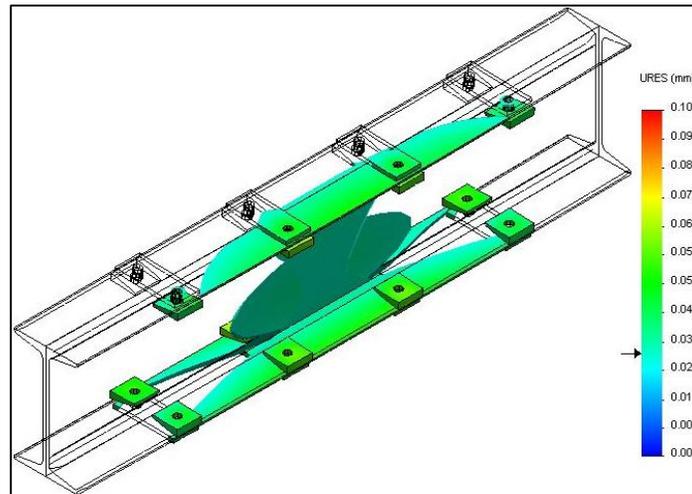
Datos de resistencia del perno:

- Área de esfuerzo de tensión: 0.1419 pulgadas cuadradas.

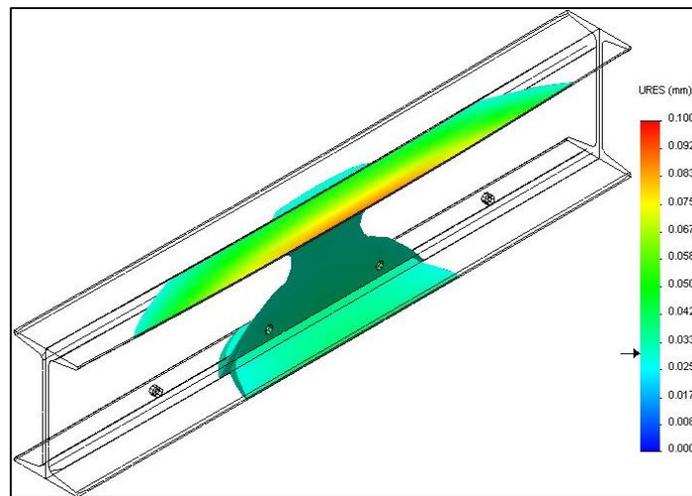
- Resistencia del perno: 120 ksi.
- Precarga: 30000 N axial.

Las sujeciones son de geometría fija (empotrado- empotrado) y se ubican en las caras extremas de las vigas. Las fuerzas externas son cargas distribuidas uniformemente sobre cada viga, con un valor igual a 5000 a 20000 N. Las platinas están compuestas del mismo material que los perfiles (A36) y poseen un espesor inicial de media pulgada. Las uniones entre platinas y las espaldas de la viga en C solo están unidas por fricción y sin posibilidad de penetración en el material. El sistema se encuentra unido debido a la precarga que ejerce los pernos en la unión. La carga que actúa es una carga de incremento progresivo, esto quiere decir que la fuerza no se considera por impacto.

Los parámetros anteriores fueron seleccionados para generar resultados confiables, con el objetivo de comparar las tensiones y deformaciones de cada propuesta. A continuación, se muestran los desplazamientos obtenidos para cada una de las propuestas bajo un estado de carga de 5000 N sobre una de las vigas y 20000 N sobre la otra. Los estados de cargas con variaciones significativas de cargas concentradas sobre las aletas se realiza debido a que en estudios anteriores se encontró que existe un mayor riesgo en la separación de las conexiones producida por excentricidades que se pueden presentar, tanto por diseño como por proceso constructivo. Estas cargas fueron cargadas sobre las aletas de cada uno de los perfiles y se simula en comportamiento por deflexión en el plano XY y deflexiones en los planos XZ y YZ debido al efecto de pandeo y torsión por excentricidad.



*Ilustración 57: Desplazamiento propuesta 1 (Autoría propia).*



*Ilustración 58: Desplazamiento propuesta 2 (Autoría propia).*

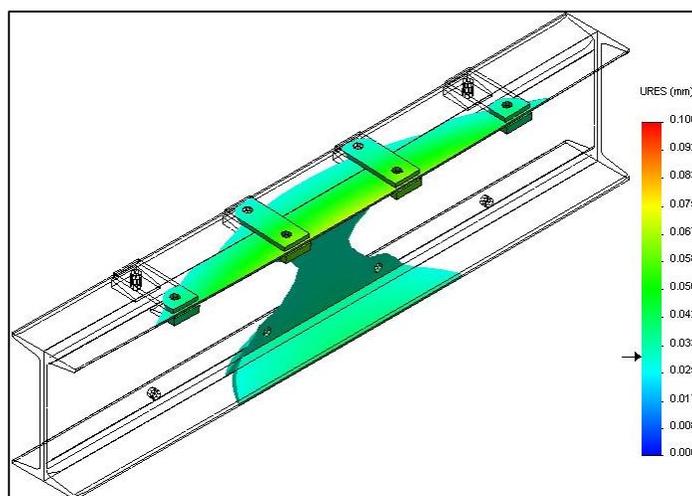


Ilustración 59: Desplazamiento propuesta 3 (Autoría propia).

### 5.1.1 RESULTADOS PRELIMINARES

Para observar de una manera objetiva los resultados anteriores, se procede a tomar los valores máximos de los desplazamientos resultantes, a lo largo del eje X y el eje Y, para diferentes estados de carga siendo el estado 1 de 5000 N sobre un perfil y 20000 en el otro, el estado 2; 10000 N y 20000 N y el estado 3; 20000 en ambos perfiles.

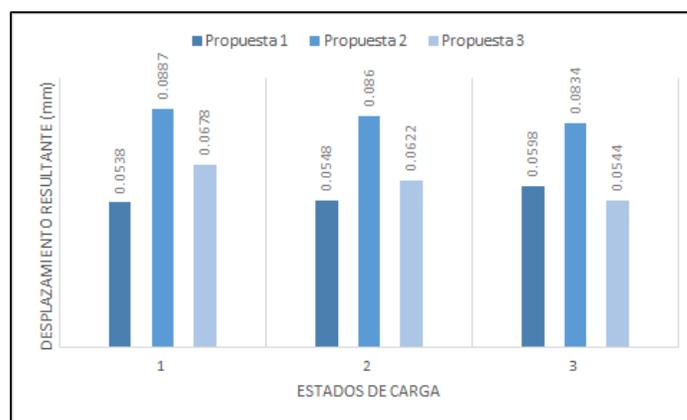


Ilustración 60: Desplazamientos resultantes en el eje Z (Autoría propia).

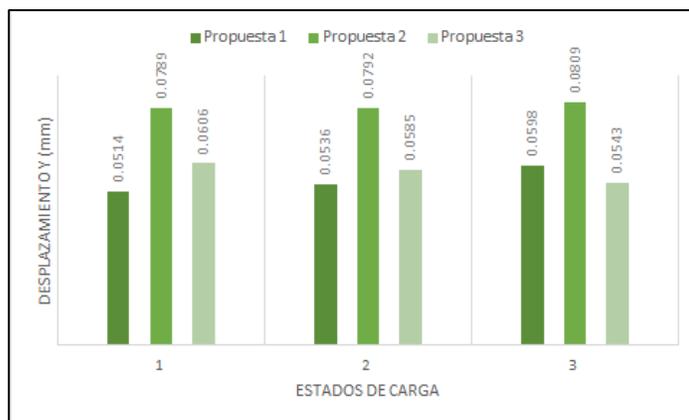


Ilustración 61: Desplazamiento resultante en el eje Y (Autoría propia).

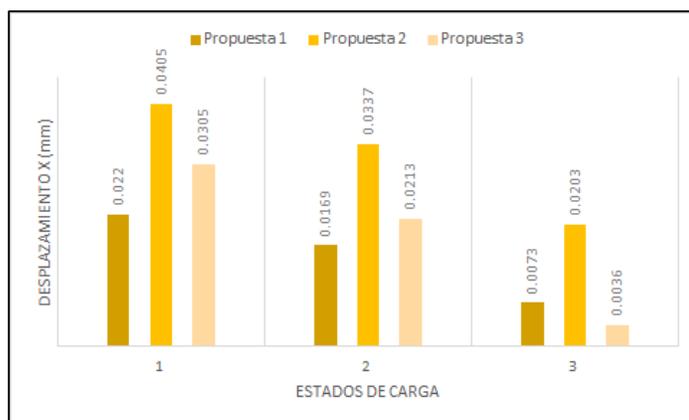
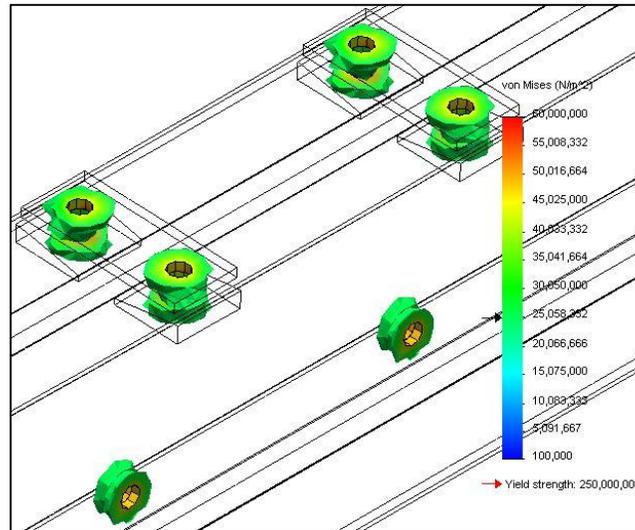


Ilustración 62: Desplazamiento resultante en el eje X (Autoría propia).

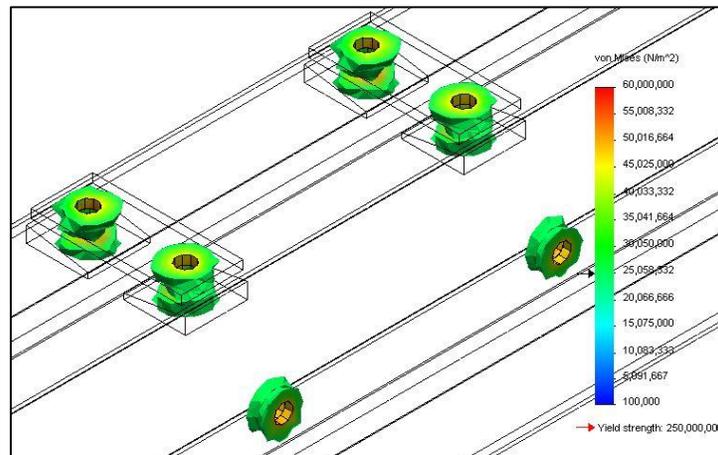
Al observar los resultados anteriores, se elige la propuesta 3 debido a la distribución de deformación que muestra pues reduce la deformación superior en comparación con la propuesta 2 y presenta menor deformación en la parte inferior en comparación con la propuesta 1. Además, el costo de esta propuesta es menor que el de la primera debido a que posee menos platinas, arandelas y agujeros.

A continuación, se evalúa la distribución de los agujeros inferiores con respecto a las platinas, a lo largo de la viga. Se proponen 2 distribuciones diferentes: platinas

superiores y agujeros inferiores intercalados entre sí o platinas y agujeros sobre el mismo plano. Los resultados de los estudios correspondientes se muestran a continuación:

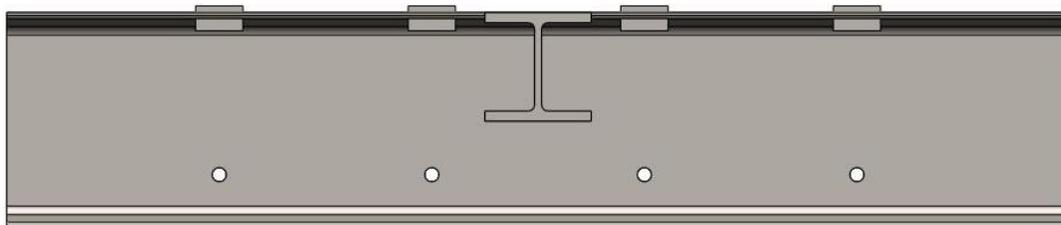


*Ilustración 63: Agujeros sobre el mismo plano. Propuesta 3 (Autoría propia).*



*Ilustración 64: Agujeros en planos separados. Propuesta 3 (Autoría propia).*

Se observa que la distribución de esfuerzos en ambas propuestas es aproximadamente igual, por lo tanto se escoge la propuesta con perfiles sobre el mismo plano debido a que posee un mayor área libre sobre su alma para unir mediante soldadura un perfil estructural en H. Teniendo en cuenta las fuerzas que dicho perfil le transmite al perfil en C al cual va soldado, es necesario optimizar la distancia entre las platinas más cercanas al perfil en H y su plano medio vertical para atenuar la deformación. Las dos opciones a evaluar son 200 mm o 150 mm entre los centros de las platinas.



*Ilustración 65: Distancias de perforaciones y platinas entre el nervio en H (Autoría propia).*

Los resultados de esfuerzo de Von Mises, desplazamiento y deformación no presentan variaciones significativas entre ambas propuestas. En el estudio se deseó evaluar el comportamiento de cada uno de los perfiles cuando es sometido a cargas variantes. El estudio se basa en la hipótesis de deformación interna irregular. Nos referimos a esto como las separaciones internas que se presentan en la unión espalda con espalda de cada uno de los perfiles en C. A continuación se presentan los resultados deformados en escala 300:1.

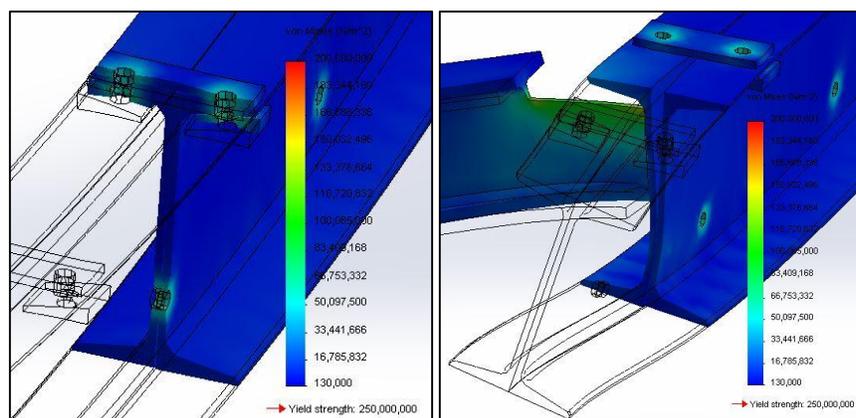


Ilustración 66: Deformación aumentada de los perfiles en C (Autoría propia).

## 5.2 ANÁLISIS DE CONEXIÓN COLUMNA RECEPTORA – MÓDULO DE ENTREPISO

### 5.2.1 DISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS

Cada módulo de columna receptora posee brazos de longitud  $l = 0,22 \times m$  y  $0,22 \times n$ . Las dimensiones se encuentran al evaluar un sistema de viga empotrado-empotrado en sus extremos, con una carga rectangular  $W/mm$  uniformemente distribuida en toda su longitud (cargas muertas y cargas vivas). Esta hipótesis de carga se basa principalmente en la distribución del peso del piso de la edificación en la cual se considera uniforme sobre cada uno de los elementos estructurales tipo viga y no considera las cargas puntuales generadas por lo apoyos existentes articulados [18].

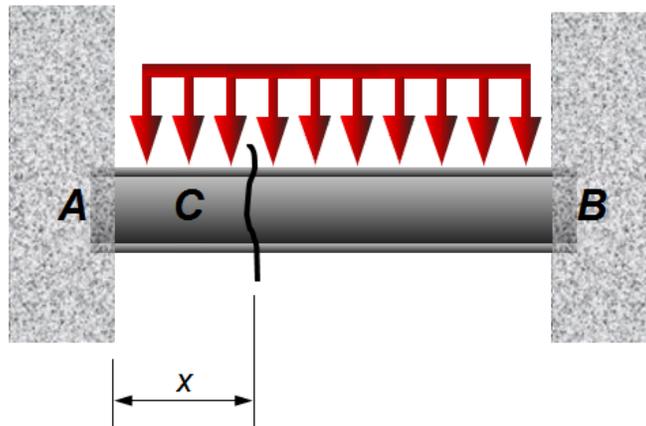


Ilustración 67: Representación de la distribución de la carga sobre la viga (Autoría propia).

Con base en la Ilustración 67 se desarrolla la sumatoria de las reacciones en A y en B.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y + B_y - w * L = 0 \rightarrow A_y = B_y = \frac{wL}{2}$$

Para completar las ecuaciones de equilibrio, se lleva a cabo una sumatoria de momentos respecto al apoyo A.

$$\sum M_A = 0 \rightarrow M_A - M_B + \frac{wL^2}{2} - \frac{wL^2}{2} = 0$$

Luego, se realiza un corte a una distancia x a partir del apoyo A y se realiza sumatoria de momentos en el punto de corte C.

$$\sum M_C = 0 \rightarrow M_C = M_A + A_y x - \frac{wx^2}{2}$$

Integrando la ecuación del momento con respecto a x, se obtiene la ecuación del ángulo de deflexión en función de la longitud.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_C}{E * I} \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{1}{E * I} \left( \frac{A_y x^2}{2} + M_A x - \frac{wx^3}{6} + C_1 \right)$$

Con la condición de frontera  $[x = 0, \theta = 0]$  se encuentra que  $C_1 = 0$ . Reemplazando  $[x = L, \theta = 0]$  y el valor de  $A_y$  en la ecuación anterior, se obtiene el valor de  $M_A$ .

$$\frac{A_y L^2}{2} + M_A L - \frac{wL^3}{6} = 0 \rightarrow M_A = -\frac{wL^2}{12}$$

Introduciendo el resultado anterior dentro de la ecuación 3, se obtiene la ecuación del momento a lo largo de la viga en función de la longitud.

$$M_C = -\frac{w}{2}x^2 + \frac{wL}{2}x - \frac{wL^2}{12}$$

Para encontrar la distancia  $x$ , desde cada apoyo, en la cual el momento es igual a cero reemplazo  $M_C = 0$  en la ecuación anterior y despejo  $x$ .

$$x = \frac{L(1 \pm \sqrt{1/3})}{2} \approx 0.211L$$

Para la corroboración se realiza el análisis en un programa de cálculo estructural, [30], [31], [35], [36], en el cual se analiza un módulo básico MPOSS sometido bajo condiciones normales de uso de carga (Ilustración 68). Se utilizaron 4 módulos de columnas receptoras, y un módulo de entrepiso. Se utilizaron columnas de 3000 mm de longitud y de sección rectangular del módulo de entrepiso de 6000 x 3500 mm, entrelazado por nervios de manera longitudinal y transversalmente. Los parámetros los análisis se presentan en las Tabla 16 y 17.

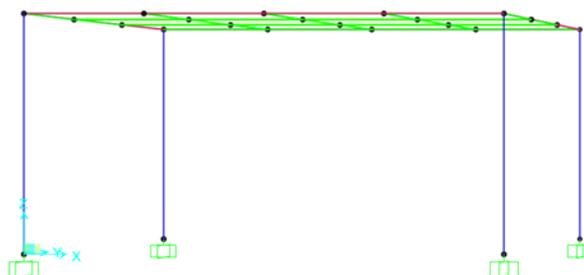


Ilustración 68: Pórtico estructural (Autoría propia).

Para la definición de las cargas vivas y muertas se establece la zona de estudio como espacio de circulación con una distribución uniforme de la carga sobre toda la superficie (ver Tabla 17). Este análisis considera las cargas gravitacionales (incluyendo los pesos de cada uno de los perfiles estructurales y el piso). Las cargas puntuales de conexión articulada y el efecto P-delta generado por los desplazamiento relativos de cada uno de los nodos entran en consideración en este análisis. Para este estudio no se consideraron los efectos de sismos ni de vientos debido a que solo es para efectos comparativos. Cada elemento estructural es convertido a elementos tipo barra unidos sin generar excentricidades adicionales; las restricciones se presentan en la tabla 6 representadas en la figura 8A.

Tabla 16: Definición condiciones de uso.

Característica	Definición
Tipo de Uso	Edificaciones de atención a la comunidad
Zona de amenaza sísmica	Intermedia
Material estructural	Acero
Sistema estructural	Pórticos resistente a momentos
Definición perfiles de suelo	Suelo denso con roca blanda (tipo C)

Tabla 17: Cargas vivas y muertas simplificadas.

	Características	Definición
Vivas	Circulación ( $\text{kg/m}^2$ )	500
	Empozamiento ( $\text{kg/m}^2$ )	0
	Nieve ( $\text{kg/m}^2$ )	0
Muertas	Densidad del acero ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
	Peso piso aglomerado ( $\text{kg/m}^2$ )	27

Con base en el análisis estructural del sistema porticado de la Ilustración 68 en el programa de simulación MEF se obtiene una gráfica del comportamiento de momentos respecto al eje x (Ilustración 69). Las reacciones de momentos internos son aproximadamente cero en las distancias 770,67mm y 2676,56 mm respecto a una viga de 3500 mm; representa el 22,01% y 23,52% respectivamente midiendo del extremo más cercano. Se obtiene una relación promedio del 22.21% con una desviación estándar de 0,99 respecto al cálculo teórico obtenido.

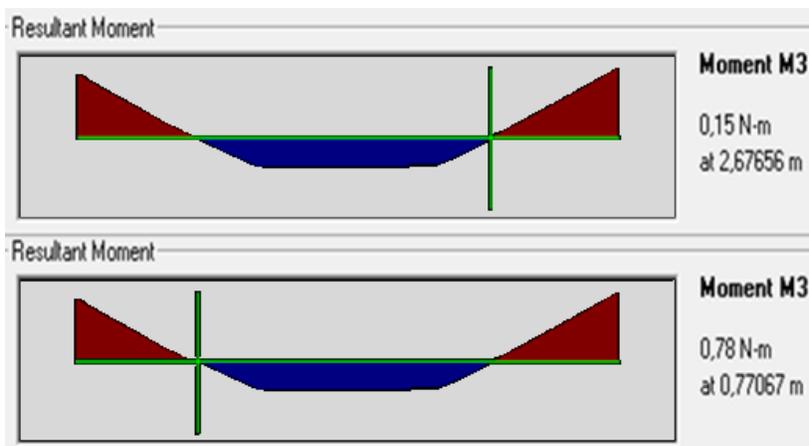


Ilustración 69: Curva de momentos en viga bajo efectos de cargas vivas y muertas (Autoría propia).

### 5.2.2 ANÁLISIS DINÁMICO

Para la validación del sistema de ensamble se analizan dos sistemas de pórticos (Ilustración 70). Se utilizaron configuraciones y restricciones diferentes con el objetivo de analizar, comparar y validar el comportamiento del modo de ensamble del módulo de entrepiso con el módulo de columnas receptoras en relación a una configuración de un sistema constructivo tradicional. El primero es representado utilizando un sistema porticado resistente a momentos de segmentos completos (Ilustración 70A). El segundo es un sistema porticado de segmentos interrumpido, conformado por un módulo de entrepiso y el modo de ensamble con el módulo de columnas receptoras (Ilustración 70B). Cada viga está dividida en 3 partes de acuerdo al estudio realizado anteriormente. El comportamiento de los sistemas fue analizado en paralelo utilizando dos combinaciones de carga: Carga muerta + Carga viva y Carga muerta + Carga Viva + Sismo\_x. Las restricciones de las conexiones están condensadas en la .

El cálculo estructural se rige de acuerdo con el procedimiento que establece el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 [37], basándose en las combinaciones de carga bajo el método de resistencia, en relación a los parámetros presentados en las Tablas 16 y 17.

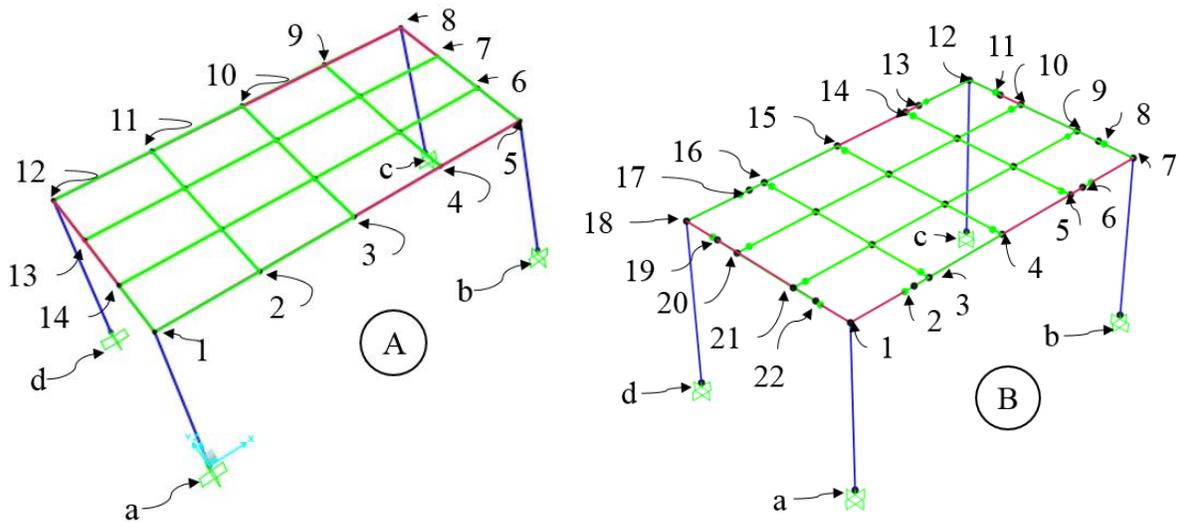


Ilustración 70: A) Modelado pórticos segmento viga completa (Autoría propia).

Tabla 18: Restricciones de nodos.

Figura 8A	
Nodo	Restricción
1,5,8,12	A, C1, C2, M1, M2, T
2,3,4,6,7,9,10,11,13,14	C1, C2, T
a, b, c, d	Empotrado

Figura 8B	
Nodo	Restricción
1,7,12, 18	A, C1, C2, M1, M2, T
3, 4, 5, 9, 10, 14, 15, 16, 20, 21	C1, C2, T
2, 6, 8, 11, 13, 17, 19, 22	A, C1, C2
a, b, c, d	Empotrado

- A= Trasmite fuerza axial
- C1= Trasmite fuerza cortante eje X
- C2= Trasmite fuerza cortante eje Y
- M1= Trasmite momento eje X
- M2= Trasmite momento eje Y
- T= Trasmite momento torsor

### **5.2.2.1 Resultados preliminares:**

Los resultados obtenidos respecto a los análisis dinámicos realizados a los dos tipos de módulos muestran que las reacciones de momentos en los puntos de apoyo 1,5 (Ilustración 70A) y 1,7 (Ilustración 70B) tienen una relación promedio del 90,16% con una desviación estándar de 5,17.

La flecha máxima presentada, bajo cargas de uso diario, en el punto 3, 10 (Ilustración 70A) y punto 4, 15 (Ilustración 70B) tiene una relación promedio del 98.95% con una desviación estándar de 1,8. Así mismo, la deriva máxima presentada, bajo sismo en x, en el punto 5, 8 (Ilustración 70A) y 7,12 (Ilustración 70B) tiene una relación promedio de 99,97% y una desviación estándar de 0,00622.

De acuerdo al análisis dinámico muestra una relación promedio del 96% respecto al sistema de unión modular seccional y a un sistema convencional de extremos empotrado-empotrado bajo cargas gravitatorias y una relación del 90% bajo cargas sísmicas.

El sistema de pisos flotantes diseñados en fibra de vidrio y poliuretano disminuye el peso aproximado de los entrepisos en un 66% con relación a una losa de concreto de 5 cm de espesor.



## 6 PROTOTIPO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL

El caso de estudio se centra en el diseño del bloque prototipo para la Universidad EAFIT en la ciudad de Medellín-Antioquia. La edificación se plantea ubicar sobre el campus universitario la cual estaría ubicada en dirección Norte-Sur en su lado más largo. La edificación se establece para 3 pisos los cuales están compuestos por oficinas, zonas de estudio y monitorias y un área de esparcimiento. La edificación está compuesta por una terraza, la cual debe resistir el tránsito de personas y mobiliario. La edificación por lo tanto tendrá un área de 128 metros cuadrados incluyendo el área de la terraza como área útil.

La edificación está diseñada para utilizar 8 módulos de piso, los cuales tiene dimensiones 3000x3500 milímetros. Objetivo de este prototipo es poder corroborar los distintos tipos de conexiones que se pueden presentar con este modelo constructivo. Cada piso tiene una altura de 3000 mm dando como resultado una altura total de la edificación de 6000 mm.

La fachada se contempla en una combinación de vidrio con fibra de vidrio en todo su contorno; debido a que es una edificación modelo para el anteproyecto, no existe el detalle que exprese la zonificación del vidrio. Sin embargo se planteó un propuesta inicial de diseño.

En la terraza se plantea inicialmente colocar una zona de dispersión para los estudiantes, los cuales contempla la colocación de pasto sintético sobre la terraza; adicional se plantea colocar mesas de estudio y como fachada, un contorno en vidrio.

El modo de ingreso al prototipo se plantea utilizando escaleras exteriores, las cuales van apoyadas sobre los módulos de columnas receptores y hacen parte del modelo constructivo. Las fachadas serán sostenidas utilizando un sistema de soporte vertical fabricado en acero de manera modular.

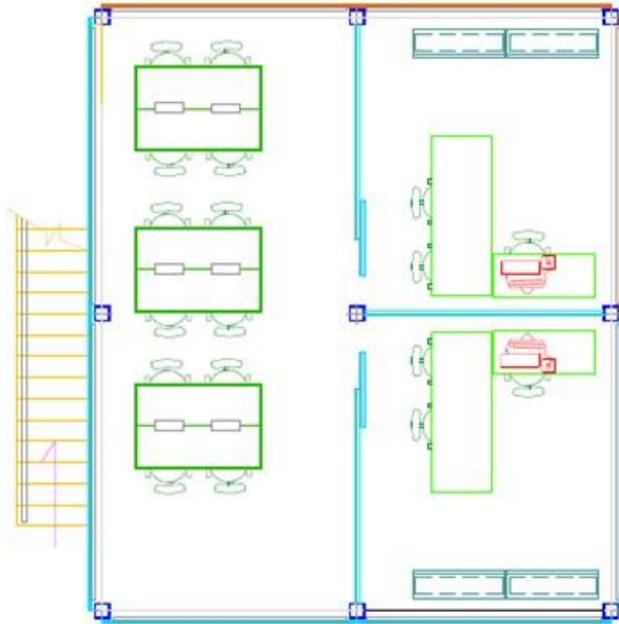


Ilustración 71: Piso 1: área de oficinas y zonas de estudio (Autoría propia).

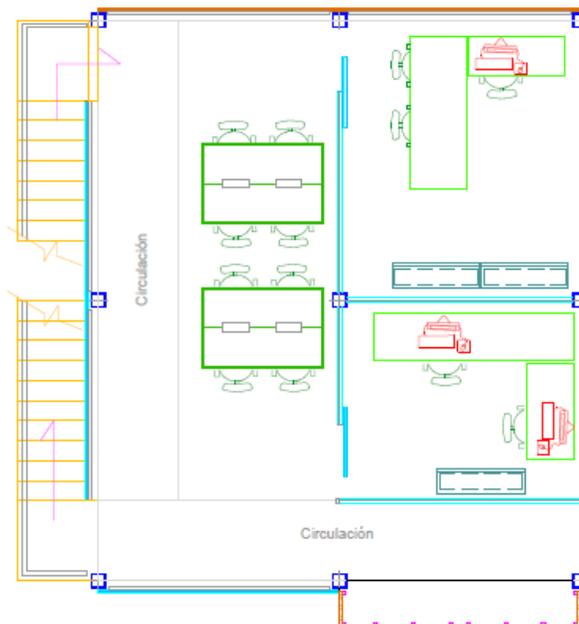


Ilustración 72: Piso 2: área de monitorías y asesorías (Autoría propia).

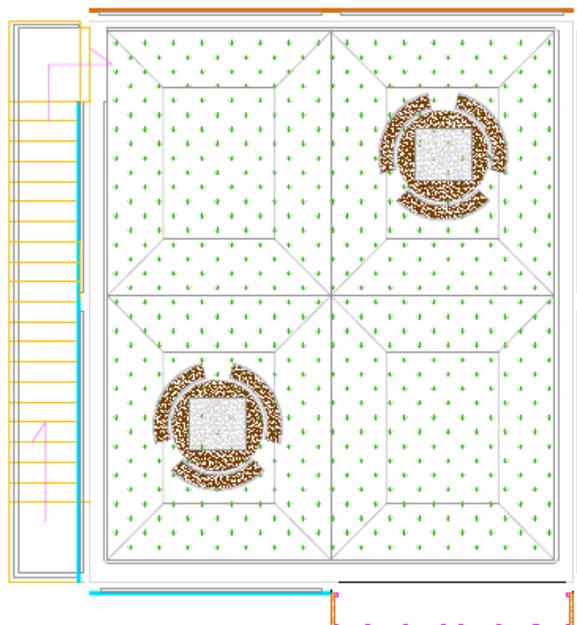


Ilustración 73: Piso 3: área de estudio y esparcimiento (Autoría propia).

## 6.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para el desarrollo del prototipo se establece una zona y un tipo de terreno comúnmente encontrado (suposición).

**Localización:** Medellín,  $A_a = 0.15$  y  $A_v = 0.2$  (NSR-10 Capítulo A.4).

**Zona de amenaza sísmica:** Intermedia.

**Uso:** Centro de enseñanza, Área de asesorías y estudio, Universidad EAFIT.

**Sistema estructural:** Sistema de resistencia sísmica (cargas horizontales) y sistema de resistencia para cargas verticales = Pórtico resistente a momento con capacidad moderada de disipación de energía (DMO).

**Perfil de suelo:** D,  $F_a = 1,5$  y  $F_v = 2,0$  (NSR-10 Tablas A.2.4-3 y A.2.4-4).

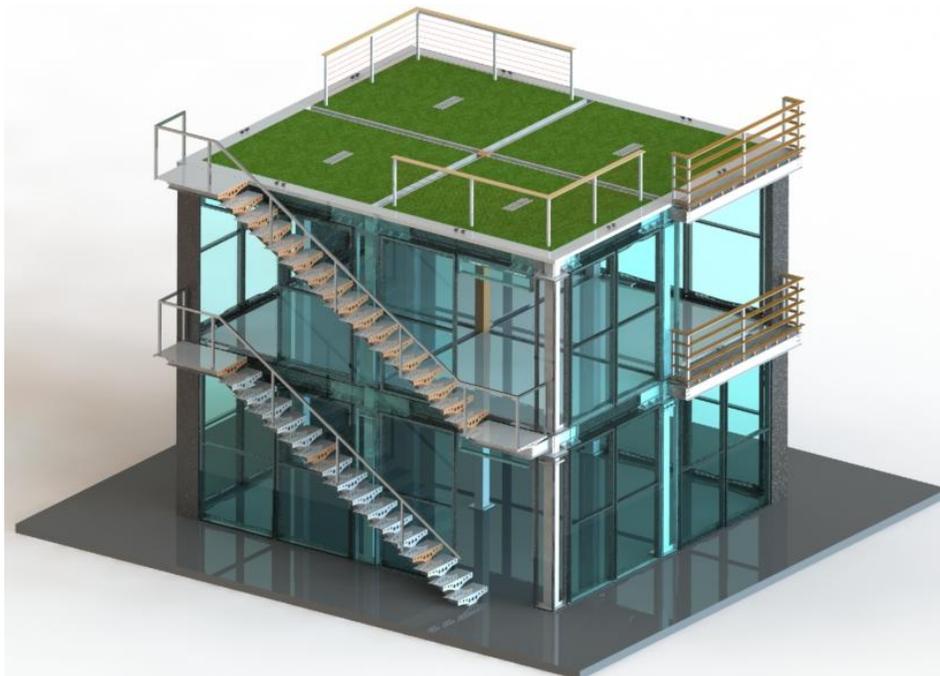
**Grupo de Uso 3:** Coeficiente de importancia  $I=1.25$  (Tabla A.2.5-1).

## 6.2 COMPONENTES ESTRUCTURALES

La estructura está compuesta por la combinación de los módulos mostrada anteriormente en los planos. Se compone básicamente de 4 elementos estructurales principales:

- *Columnas:* perfiles de sección cerrada cuadrada o rectangular utilizado como material el acero ASTM A500 Grado C.
- *Vigas de Borde:* perfiles de sección en I o H utilizado como material el acero A36.
- *Vigas internas:* perfiles en H formados por medio de la unión de dos perfiles en C espalda con espalda ][ fabricados en acero A36.
- *Nervios:* perfiles en I o H de acero a A36.

Los elementos vigas están compuestos por tres secciones definidas en un 20% 60% y 20% de la longitud de la viga no arriostrada; la unión en cada uno de los extremos de las vigas se consideran empotrado-empotrado pero la unión entre secciones de viga se consideran simplemente apoyado con capacidad moderada resistente a momentos; a pesar de esto el elementos se considera continuo en toda su longitud. La forma de unión de las secciones de viga se realizará por medio de pernos de alta resistencia.



*Ilustración 74: Modelado de prototipo (Autoría propia).*

Los nervios irán incluidos en los módulos e irán simplemente apoyados en las vigas para que cumplan su función de losa al transmitir cargas verticales sin hacer parte del sistema estructural. La unión de los nervios a las vigas se realiza por medio de uniones simple utilizando ángulos de acero pernado a la estructura.

El piso se definen como placas prefabricadas en fibra de vidrio y resina de poliuretano, las cuales son colocadas encima de la estructura y son unidas al cada uno de los módulos por medio de pernos a lo largo de las vigas y con tornillos de sujeción a lo largo de los nervios.

Las columnas son concebidas como elementos estructurales con ramificaciones que permitan el acople de cada uno de los módulos; cada columna por lo tanto contiene, el perfil estructural de soporte o columnas y brazos de acople los cuales son soldados

a la columna; en los extremos de cada uno de estos elementos poseen placas para la conexión con las siguiente columna por medio de pernos de alta resistencia.

### 6.3 PERFILES ESTRUCTURALES

Para el análisis previo se plantean perfiles estructurales nombrados a continuación:

Columnas: Perfil PTEC 5"x5", e=5,5 mm

Nervios: Perfil WF 6x9 pulgadas

Vigas de Borde I: WF 6x15 pulgadas

Vigas internas ][: perfil C 4x5,4 pulgadas

### 6.4 MATERIALES

Los materiales utilizados se describen a continuación las propiedades mecánicas obtenidas de las tablas de los fabricantes; El compuesto que se utiliza para el piso, se obtuvieron luego de realizar ensayos preliminares en laboratorio, sin embargo al ser un elemento compuesto el módulo de elasticidad debe ser ajustado para un real análisis.

#### Acero A500 Grado C:

- $F_y = 344$  MPa.
- $F_u = 427$  MPa.
- $E = 200000$  MPa.
- Densidad:  $7850$  Kg/m<sup>3</sup>.
- Poisson: 0,33

#### Acero A36:

- $F_y = 250 \text{ MPa}$ .
- $F_u = 400 \text{ MPa}$
- $E = 200000 \text{ MPa}$ .
- Densidad:  $7850 \text{ Kg/m}^3$ .
- Poisson: 0,33

### Compuesto Fibra de Vidrio:

Este compuesto está conformado por 3 elementos principales: placas base fabricadas en fibra de vidrio; relleno fabricado en resina de poliuretano inyectado; soportes verticales fabricados en fibra de vidrio. Cada uno de estos elementos cumple una función principal, pero para el análisis en el programa estructural se contempla varias hipótesis.

- La densidad se toma teniendo en cuenta la fibra de vidrio y la resina de poliuretano con un espesor de 70 mm, obteniendo una densidad relativa de  $540 \text{ Kg/m}^3$ .
- Debido a que la resina de poliuretano es débil a los esfuerzos de compresión, cortante y flexión, la resistencia del material es producida por la configuración de la fibra de vidrio, por lo tanto el módulo de elasticidad será considerado como el esfuerzo de fluencia en el plano de flexión debido a que es un material anisotrópico. El módulo de elasticidad en el plano de flexión es de 73 GPa.

## **6.5 CARGAS**

### **6.5.1 CARGAS MUERTAS**

Para el anteproyecto la fachada fue contemplada en muros cortina de vidrio, cuyo peso recomendado por la Norma NSR-10 es de  $50 \text{ Kg/m}^2$ ; la carga de la fachada fue colocada a lo largo de la viga como una carga uniformemente distribuida con un valor

de 150Kg/m en el perímetro de los pisos 1 y 2; para el piso 3, al ser una baranda a media altura se colocar una carga uniformemente distribuida de 125 Kg/m.

El muro divisorio fabricado en fibra de vidrio con aislante térmico y acústico de peso liviano, con una altura de 3 metros se estima un peso de 100 Kg/m.

### 6.5.2 CARGAS VIVAS

Se consideran cargas uniformemente distribuidas de acuerdo a la NSR-10, Titulo B de la siguiente manera:

- Salones: 200Kg/m<sup>2</sup>
- Corredores y escaleras: 500 Kg/m<sup>2</sup>
- Oficinas: 200 Kg/m<sup>2</sup>
- Cuartos privados (Baños): 180 Kg/m<sup>2</sup>
- Cubierta: De acuerdo al numeral (B) de la tabla B.4.2.1-2 de la NSR-10, y las Notas 2 y 3, se considera una carga viva para la cubierta con acceso al público o los usuarios de la edificación sin restricción de 500 Kg/m<sup>2</sup> de área en planta.

*Tabla 19: Cargas vivas para las distintas áreas.*

ÁREA	CARGA (Kg/m <sup>2</sup> )
Salones	200
Corredores y escaleras	500
Oficinas	200

Cuartos privados	180
Cubierta	500

### 6.5.3 EMPOZAMIENTO

La terraza cuenta con una superficie que posee una inclinación de 2° con canaletas lo suficientemente adecuadas para la evacuación rápida del agua, sin embargo, se consideró un empozamiento de 4 cm de altura de agua lo cual significa una carga uniformemente distribuida de 40 Kg/m<sup>2</sup> sobre toda la superficie (Densidad del agua dulce 1000 Kg/m<sup>3</sup> Tabla B.3.2-1).

### 6.5.4 FUERZA DE VIENTO

El título B.6 de la NSR-10: Fuerzas de viento especifica los métodos por los cuales se determinan las fuerzas de viento actuantes sobre la estructura. SAP puede aplicar las fuerzas basadas en la misma norma en la que se basa la NSR-10: ASCE 7-05. Con una velocidad de viento aproximada para Medellín de 120 Km/h (Figura B.6.4-1 NSR-10), esto es 74,56 millas por hora (mph); calculando y definiendo los factores topográficos y de exposición como lo recomienda la Norma en su método simplificado (Método 1).

## 6.6 ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis dinámico se utilizó un programa de simulación estructural en el cual fueron modelados cada uno de los componentes primarios y secundarios, enfatizando en las conexiones de cada uno de estos elementos.

Para el análisis de los elementos estructurales del edificio se realizará contemplando una articulación en su base; esta suposición se hace debido a que las bases de

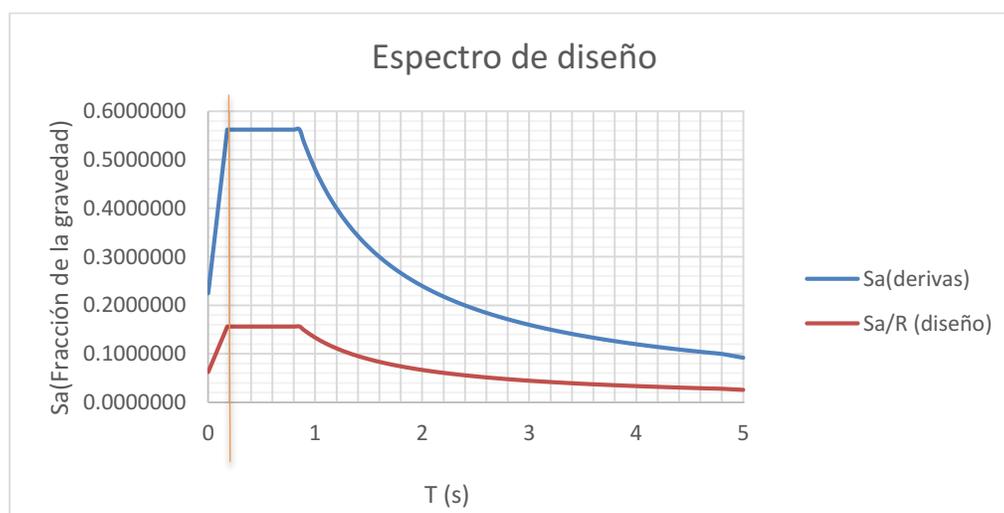
empotramiento son bastante difíciles de lograr, por lo tanto se deja libre ciertos desplazamientos. Los parámetros de análisis son contemplados en el numeral 4.

Para el análisis dinámico se consideró el centro de masa de la estructura considerando el peso propio de la estructura y las cargas muertas.

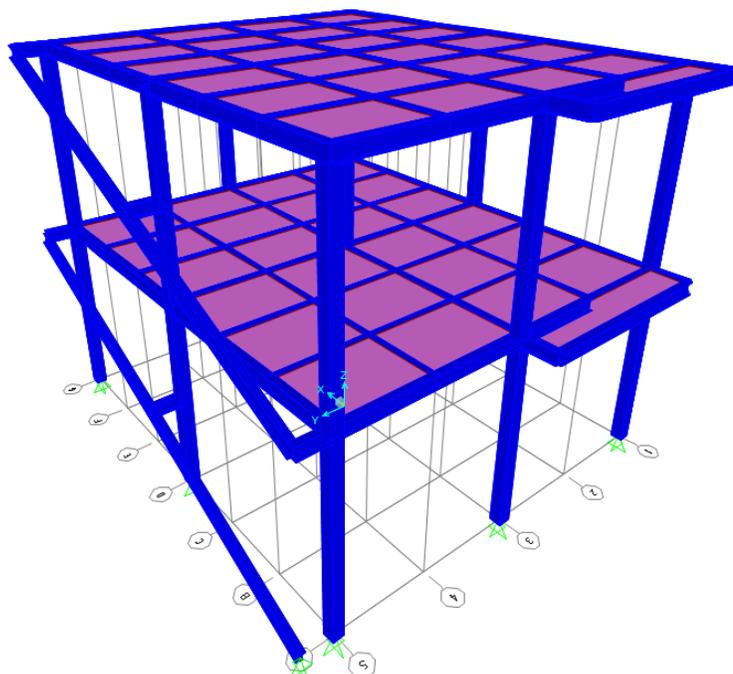
Para el análisis estructural se realiza el análisis modal el cual indica las reacciones en la base y los periodos relacionados respecto a cada uno de los modos; periodo de vibración es de 0,29 seg en el modo 1.

El espectro de diseño se realiza teniendo en cuenta las características definidas en el punto LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA descritas a continuación:

- **Localización:** Medellín,  $A_a = 0.15$  y  $A_v = 0.2$  (NSR-10 Capítulo A.4).
  - **Perfil de suelo:** D,  $F_a = 1.5$  y  $F_v = 2.0$  (NSR-10 Tablas A.2.4-3 y A.2.4-4).
- Grupo de Uso 3:** Coeficiente de importancia  $I=1.25$  (Tabla A.2.5-1).



*Ilustración 75: Curva de aceleración de la estructura para derivas y para diseño estructural (Autoría propia).*



*Ilustración 76: Modelado en programa de análisis estructural (Autoría propia)*

Para el análisis de derivas ( $F=F_s$ ) se define el espectro utilizando un coeficiente de importancia  $I$  igual a 1.0. Para el diseño de los elementos se define el espectro de diseño con el coeficiente de importancia perteneciente a la estructura,  $I$  igual a 1.25 sin embargo se reduce por el factor de reducción de resistencia  $R$  (A.6.2.1.2, pág. A-74 de la NSR.-10).

## **6.7 COMBINACIONES DE CARGA**

Las combinaciones de cargas principales se obtuvieron de la norma Colombiana NSR-10, sin embargo las variaciones de las combinaciones de carga para cada uno de los elementos estructurales fueron escogidas en base a razonamiento técnico.

Tabla 20: Combinaciones de cargas.

COMBINACIONES DE CARGA NSR-10		
1	1.4D	VIGAS, COLUMNAS, LOSAS (NERVIOS)
2-A	$1.2D+1.6L+0.5Le$	
2-B	$1.2D+1.6L+0.5Lr$	
3-A	$1.2D+ 1.0L+1.6Le$	
3-B	$1.2D+ 1.0L+1.6lr$	
3-C	$1.2D+1.6Le+0.5Wx$	
3-D	$1.2D+1.6Le+0.5Wy$	
3-E	$1.2D+1.6Le-0.5Wx$	
3-F	$1.2D+1.6Le-0.5Wy$	
4-A	$1.2D+1.0L+0.5Le+Wx$	
4-B	$1.2D+1.0L+0.5Le+Wy$	
4-C	$1.2D+1.0L+0.5Le-Wx$	
4-D	$1.2D+1.0L+0.5Le-Wy$	
5-A	$1.2D+1.0L+1Ex+0.3Ey$	
5-B	$1.2D+1.0L+1Ex-0.3Ey$	
5-C	$1.2D+1.0L-1Ex+0.3Ey$	
5-D	$1.2D+1.0L-1Ex-0.3Ey$	
5-E	$1.2D+1.0L+1Ey+0.3Ex$	

5-F	$1.2D+1.0L+1Ex-0.3Ey$	
5-G	$1.2D+1.0L-1Ex+0.3Ey$	
5-H	$1.2D+1.0L-1Ex-0.3Ey$	
5-I	$1.2D+1.0L+1Ex$	
5-J	$1.2D+1.0L-1Ex$	VIGAS
5-K	$1.2D+1.0L+1Ey$	
5-L	$1.2D+1.0L-1Ey$	
6-A	$0.9D+Wx$	
6-B	$0.9D-Wx$	COLUMNAS
6-C	$0.9D+Wy$	
6-D	$0.9D-Wy$	
7-A	$0.9D+1.0Ex+0.3Ey$	
7-B	$0.9D+1.0Ex-0.3Ey$	
7-C	$0.9D-1.0Ex+0.3Ey$	
7-D	$0.9D-1.0Ex-0.3Ey$	
7-E	$0.9D+1.0Ey+0.3Ex$	
7-F	$0.9D+1.0Ey-0.3Ex$	
7-G	$0.9D-1.0Ey+0.3Ex$	
7-H	$0.9D-1.0Ey-0.3Ex$	
7-I	$0.9D+1.0Ex$	

7-J	0.9D-1.0Ex	
7-K	0.9D+1.0Ey	
7-L	0.9D-1.0Ey	
SISMO X	1.0F <sub>sx</sub>	DERIVAS
SISMO Y	1,0F <sub>sy</sub>	

Las anteriores combinaciones son utilizadas para diseño, cada grupo es utilizado para realizar la envolvente de los elementos especificados.

Para el estudio de las derivas, como se muestra, se utiliza una fuerza de sismo netamente en la dirección X y en la dirección Y, además de todas las variaciones de las combinaciones 5 y 7 pero con los sismos definidos para derivas.

La NSR 10 recomienda la utilización de ciertas combinaciones con el sismo multiplicado por un factor de 2 para el diseño a cortante de las vigas en estructuras de concreto reforzado, por lo tanto estas no fueron tenidas en cuenta.

## 6.8 ANÁLISIS DE DERIVAS

Antes de proceder con el diseño y definición de los elementos se debe asegurar que la estructura cumpla con las derivas requeridas en el título A.6 de la NSR-10, las cuales deben ser menores al 1% de la altura de cada planta. La deriva máxima presentado en un piso fue de 15 mm que corresponde al 0.5% de la altura de cada piso.

## **6.9 ENVOLVENTE DE MOMENTOS**

Antes de correr el análisis con los casos de carga, se deben definir las envolventes de momentos para el diseño de los elementos. En la tabla de casos de carga anteriormente mostrada se señala que casos de carga deben ser utilizados para cada tipo de elemento, ya sea viga, columna o nervios. Los casos que contienen sismos utilizan el espectro para diseño que es menor al espectro para derivas.

Las ecuaciones presentadas a continuación fueron sacadas de diferentes autores de manera complementaria [30], [37], [38]7..

## **6.10 CALCULO ESTRUCTURAL**

### **6.10.1 CÁLCULO DE VIGAS**

Debido al diseño de cada uno de los módulos, se escogieron 5 vigas por piso las cuales sufren mayores cargas y servirán como base para el cálculo de todas las vigas correspondientes de cada piso. La discriminación se realiza debido a que lo módulos se pretenden estandarizar en su mayoría; Sin embargo todas las vigas serán revisadas y chequeadas. [30] [28].

A continuación se procede a describir el procedimiento detallado para el cálculo de todas las vigas de la edificación:

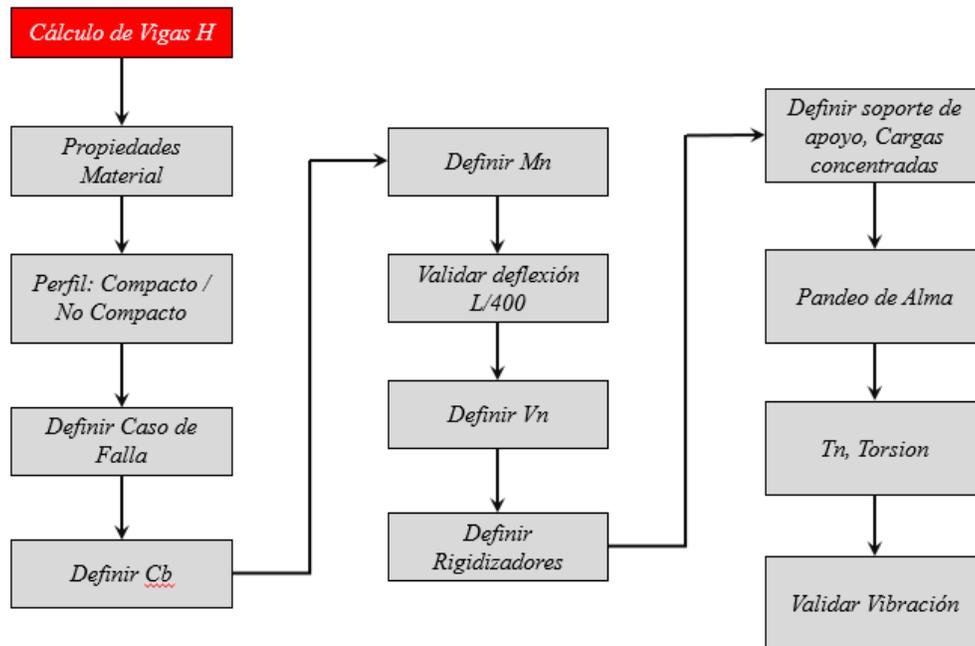


Ilustración 77: Diagrama para el cálculo de vigas (Autoría propia).

#### 6.10.1.1 **Propiedades del material:**

Se debe especificar todas las propiedades pertenecientes al material y el perfil inicialmente escogido.

Tabla 21: Propiedades básicas de perfiles.

Módulo de Elasticidad (E)	Módulo de sección X (Sx)	Altura Total (H)
Esfuerzo de Fluencia (Fy)	Módulo de sección Y (Sy)	Base total (B)

Inercia X (Ix)	Módulo Plástico X (Zx)	Altura centroide Alas (ho)
Inercia Y (Iy)	Módulo Plástico Y (Zy)	Espesor patín (t)
Radio de giro X (rx)	Módulo torsional (J)	Espesor alma (tw)
Radio de giro Y (ry)	Longitud Viga (Lb)	Radio redondeos (r)

### 6.10.1.2 Tipo Perfil:

Se define de acuerdo al perfil inicialmente escogido si es Compacto o No Compacto si los elementos son atiesados o no atiesados.

Nota: Los elementos atiesados se define para aquellos elementos que tienen soporte en sus extremos, como el caso del alma de una viga en H Ver título F-35 (NSR-10).

Para vigas en H o I con flexión en su eje mayor:

*Elementos No Atiesados:*

$$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda = b/t \quad \lambda_r = 1,0 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

*Elementos Atiesados:*

$$\lambda_p = 3,76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda = h/tw \quad \lambda_r = 5,7 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

→ Si  $\lambda \leq \lambda_p$  entonces Compacto.

→ Si  $\lambda_p \geq \lambda \geq \lambda_r$  entonces No Compacto.

→ Si  $\lambda \geq \lambda_r$  entonces Esbelto.

### 6.10.1.3 **Caso de Falla:**

Dependiendo de la propiedad determinada anteriormente, se define el tipo de falla; para esta memoria de cálculo se asume y se verifica que los perfiles sean compactos para evaluar su caso de falla por flexión. Ver página F-58 título F (NSR-10).

### 6.10.1.4 **Definición del factor de modificación para el pandeo torsional**

El factor de modificación para el pandeo torsional  $C_b$  se utiliza solo cuando sobre el segmento de viga comprendido entre dos puntos arriostrados se tiene un diagrama de momentos no uniforme Ver página F-60 título F (NSR-10).

En general se permite suponer de manera conservadora el valor de  $C_b$  igual a 1.

En caso de utilizar el valor total se realiza mediante la siguiente expresión:

$$C_b = \frac{12,5 * M_{MAX}}{2,5 * M_{MAX} + 3 * M_a + 4 * M_b + 3 * M_c} \quad Rm \leq 3.00$$

Donde:

$C_b$ = Coeficiente de multiplicación.

$M_{max}$ = Momento máximo presentado en la viga (N.mm).

$M_a$ = momento a 1/4 de longitud (N.mm).

$M_b$ = momento a 1/2 de longitud (N.mm).

$M_c$ = momento a 3/4 de longitud (N.mm).

### 6.10.1.5 **Caso de Falla por Flexión:**

Para evaluar el caso de falla por flexión se debe escoger el momento permisible menor entre el momento plástico y el momento por pandeo lateral torsional. Ver página F-60 título F (NSR-10).

Se evalúa el caso de falla por flexión dos condiciones:

1. Momento Plástico: Cuando el elemento estructural falla al sobrepasar su nivel de resistencia por encima del límite elástico hasta su punto de plasticidad.

$$Mn = M_{Plastico} = F_y * Z_x$$

2. Pandeo Lateral Torsional: puede ocurrir cuando las relaciones de longitud del elemento a flexión sobrepasan relaciones con respecto a sus propiedades geométricas.

a)  $Lb \leq Lp$  No se aplica estado límite de pandeo lateral torsional

b)  $Lp \leq Lb < Lr$

$$Mn = M_{PLT} = Cb * \left[ M_p - (M_p - 0,70 * F_y * S_x) * \left( \frac{Lb - Lp}{Lr - Lp} \right) \right] \leq M_{PLASTICO}$$

c)  $Lb > Lr$

$$Mn = M_{PLT} = F_{CR} * S_x \leq M_{PLASTICO}$$

Donde:

$$Lp = 1,76 * r_y * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$Lr = 1,95 * r_{ts} * \frac{E}{0,7 * F_y} * \sqrt{\frac{J * c}{S_x * h_o} + \sqrt{\left( \frac{J * c}{S_x * h_o} \right)^2 + 6,76 * \left( \frac{0,7 * F_y}{E} \right)^2}}$$

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}$$

$c = 1$  para perfiles en I

$$C_w = \frac{I_y * h_o^2}{4}$$

$$F_{CR} = \frac{C_b * \pi^2 * E}{\left(\frac{Lb}{r_{ts}}\right)^2} * \sqrt{1 + 0,078 * \frac{J * c}{S_x * h_o} * \left(\frac{Lb}{r_{ts}}\right)^2}$$

$Lb$ = Longitud entre dos puntos que estén arriostrados contra el desplazamiento lateral o contra la torsión (mm).

$M_p$ = Momento plástico (MPa).

$E$ = módulo de elasticidad del acero (MPa).

$J$ = módulos torsional (mm<sup>3</sup>).

$S_x$ = módulo elástico de sección (mm<sup>3</sup>).

$h_o$ = Distancia entre centroide de aletas (mm).

$F_y$ = esfuerzo de fluencia (MPa).

$I_y$ = inercia sobre el eje y (mm<sup>4</sup>)

El momento admisible será igual a:  $\phi * M_n = M_{PERMISIBLE}$

Donde  $\phi = 0,9$ .

Validación 1:  $M_{PERMISIBLE} > M_{SUFRIDO}$

### 6.10.1.6 **Deflexión máxima permisible:**

Aunque el elemento no falle, se debe verificar que la deformación en el plano actuante producido por las cargas a las que está sometida no superen ciertos rangos de estabilidad, el cual contempla no solo la funcionalidad, sino también la percepción del usuario y las vibraciones generadas.

Para el anteproyecto se define una máxima flecha permisible es de  $L/360$  donde  $L$  es la longitud total del elemento a flexión; sin embargo esta deformación debe ser la suma de la deformación de la viga en su punto máximo más la deformación de los elementos secundarios, en este caso particular los nervios transversales, debido a esto la flecha permisible es aumentada a  $L/400$ .

*Ver página 617 Capítulo 14 (Structural Steel Design, Abi Aghayere).*

Validación 2:  $\delta_{\text{SUFRIDO}} < L/400$

### 6.10.2 CORTANTE DE VIGA

El cálculo de la fuerza cortante para una viga en I o H se debe determinar para que el elemento que actúa a flexión no falle a cortante ni genere aplastamiento o arrugamiento de alma por carga puntual o distribuida; adicional se debe analizar y verificar que la sección no requiera rigidizadores a lo largo de la viga. *Ver página F-78 título F (NSR-10).*

*Nota:* Para los elementos Compactos del alma es improbable que requieran rigidizadores para cortante con una carga uniformemente distribuida, a menos de que sean cargas concentradas.

Para el cálculo estructural se plante la relación:

$$V_n = 0,6 * F_y * A_w * C_v$$

Donde:

$A_w$  = área del alma definido como  $H * t_w$ .

$C_v$  = se define de acuerdo a la relación:

$$i) \text{ Si } \frac{h}{t_w} \leq 1,10 * \sqrt{\frac{(K_v * E)}{F_y}} \text{ entonces } C_v = 1.0$$

$$ii) \text{ Si } 1,10 * \sqrt{\frac{(K_v * E)}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1,37 * \sqrt{\frac{(K_v * E)}{F_y}} \text{ Entonces } C_v = \frac{1,10 * \sqrt{\frac{(K_v * E)}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}}$$

$$iii) \text{ Si } \frac{h}{t_w} > 1,37 * \sqrt{\frac{(K_v * E)}{F_y}} \text{ Entonces } C_v = \frac{1,51 * K_v * E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 * F_y}$$

Se define  $K_v$  dependiendo si se requiere o no rigidizadores transversales a la longitud de la viga. No se requiere rigidizadores si:

$$\text{Si } \frac{h}{t_w} \leq 2,46 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ Entonces } K_v = 5$$

$$V_{\text{PERMISIBLE}} = \phi * V_n$$

Donde  $\phi = 1.0$

Validación 3:  $V_{\text{PERMISIBLE}} > V_{\text{SUFRIDO}}$

### 6.10.2.1 **Calculo de cargas concentradas (si aplica):**

Las cargas concentradas se definen como la fuerza que se aplica a una sección específica de un elemento ya sea a tensión o a compresión simple o doble; esta carga concentrada genera esfuerzos adicionales que pueden generar fluencia en el material, arrugamiento de alma, arrugamiento de aleta o pandeo de alma. Para este caso en particular, las vigas en H poseen cargas concentradas debido a los apoyos no permanentes en los tramos de sección de viga. Por lo tanto se debe evaluar que la longitud del apoyo y el espesor de placa que trasmite la fuerza sean adecuados.

Para el cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones *Ver página F-128 Titulo F (NSR-10)*.

Para este sistema de cálculo se debe comparar la altura total del perfil (d) con la longitud del apoyo (X) medida desde el inicio de la viga hasta el punto medio de la ubicación del soporte.

#### 1. Fluencia Local de Alma:

Si la distancia  $X > d$

$$R_{Permisible} = \phi_{wy} * R_n = \phi_{wy} * (5 * k + N) * F_y * t_w$$

Si la distancia  $X \leq d$

$$R_{Permisible} = \phi_{wy} * R_n = \phi_{wy} * (2,5 * k + N) * F_y * t_w$$

#### 2. Arrugamiento de Alma:

Si la distancia  $X \geq d/2$

$$R_{Permisible} = \phi_{wc} * R_n = \phi_{wc} * 0,8 * t_w^2 * \left[ 1 + 3 * \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{(E * F_y * t_f) / t_w}$$

Si la distancia  $X < d/2$  y  $N/d \leq 0,2$

$$R_{\text{Permissible}} = \phi_{wc} * R_n = \phi_{wc} * 0,4 * t_w^2 * \left[ 1 + 3 * \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{(E * F_y * t_f) / t_w}$$

Si la distancia  $X < d/2$  y  $N/d > 0,2$

$$R_{\text{Permissible}} = \phi_{wc} * R_n = \phi_{wc} * 0,4 * t_w^2 * \left[ 1 + 3 * \left( \frac{4 * N}{d} - 0,2 \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{(E * F_y * t_f) / t_w}$$

Donde:

$\phi_{wy} = 1,0$ .

$\phi_{wc} = 0,75$ .

$R_n =$  Resistencia de diseño (N).

$k =$  Propiedad de sección del perfil (mm).

$N =$  longitud del apoyo debe ser definido previamente (mm).

$F_y =$  esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$T_w =$  espesor de alma.

$d =$  distancia total del perfil H (mm).

Validación 4:  $R_{\text{PERMISIBLE}} > V_{\text{SUFRIDO\_PUNTUAL}}$

Se pre dimensiona el espesor de la placa requerida para soportar la cada cortante; vale aclarar que esta placa no se le es pernado ningún elemento de sujeción y solo se considera simplemente apoyado sobre un área pareja.

$$t_p \geq \sqrt{\frac{\left( 2 * R_u * \left( \frac{B}{2} - k \right) \right)}{0,9 * B * N * F_y}}$$

*Donde:*

*B= Ancho de la longitud de apoyo (mm).*

*k= Propiedad de sección de perfil (mm).*

*Ru= carga a resistir (N).*

*N= longitud del apoyo calculada previamente (mm).*

*Fy= esfuerzo de fluencia del material (MPa).*

### 3. Pandeo de alma por compresión:

Este numeral no aplica a este anteproyecto debido a que son cargas dobles actuantes a compresión.

#### 6.10.2.2 **Cálculo de torsión.**

El cálculo es muy importante para el diseño de vigas, especialmente para el diseño de perfiles abiertos sean simétricos simples o dobles; la torsión puede generarse principalmente por las cargas ubicadas excéntricamente en los perfiles en el caso de las fachadas flotantes.

Para nuestro ejercicio de anteproyecto, la fachada se encuentra excéntricamente apoyada sobre las vigas perimetrales en H, esta carga se encuentra uniformemente distribuida debido a la configuración de la fachada. Teniendo en cuenta lo anterior, se calcula el momento torsor.

*Ver página 233 capítulo 6 (Structural Steel Design, Abi Aghayere).*

El momento flector en el eje menor, se calcula con la relación entre la longitud del elemento y la relación entre las propiedades físicas y las propiedades geométricas.

Si  $L/a < 1$

$$M_{uy} = \frac{(w * e * L^2)}{8 * h_o}$$

$$\theta = 0,094 * \left( \frac{(w * e * L * a)}{G * J} \right) * \left( \frac{L}{2 * a} \right)^2$$

Si  $1 > L/a < 6$

$$M_{uy} = \frac{(w * e * L * a)}{h_o} * (0,097 + 0,094 * \left( \frac{L}{2 * a} \right) - 0,0255 \left( \frac{L}{2 * a} \right)^2)$$

$$\theta = \frac{(w * e * L * a)}{G * J} * (-0,032 + 0,062 * \left( \frac{L}{2 * a} \right) + 0,052 * \left( \frac{L}{2 * a} \right)^2)$$

Si  $L/a > 6$

$$M_{uy} = \frac{(w * e * a^2)}{h_o}$$

$$\theta = \left( \frac{(w * e * L * a)}{G * J} \right) * \left( \frac{L}{8 * a} - \frac{a}{L} \right)$$

*Donde:*

$$a = \sqrt{\frac{E * C_w}{G * J}}$$

$$C_w = \frac{I_y * h_o^2}{2 * S_x}$$

$\vartheta$ = Angulo de rotación sufrido (Rad).

$M_{uy}$ = Momento sufrido (Lb.in).

$T$ = Torsión aplicada (Lb.in).

$e$ = Excentricidad de la carga al eje neutro (in).

$w$ = carga distribuida a la largo de la viga (Lb/in).

$G$ = Modulo cortante (Psi).

$J$ = Constante torsional del elemento (in<sup>3</sup>).

$L$ = longitud donde está realizada la torsión (in).

$h_o$ = distancia de centroides de aletas (in).

$E$ = módulo de elasticidad (Psi).

$C_w$ = Constante de alabeo (in<sup>6</sup>).

$a$ = constante pandeo torsional.

$I_y$ = Inercia sobre el eje "y" (in<sup>4</sup>).

Al calcular el momento actuante se debe comparar con el momento permisible; el momento permisible se obtiene analizando la viga con un momento en el eje menor. El momento de diseño permisible debe ser el menor entre el momento plástico o el momento por pandeo lateral torsional. Ver página F-68 título F (NSR-10).

$$M_{PlasticoY} = 1,6 * F_y * Z_y \leq 1,6 * F_y * S_y$$

$$M_{ny} = \text{El mayor de: } M_{Plastico} \text{ ó } M_{PLT}$$

a) Aletas Compactas No se aplica estado límite de pandeo lateral torsional

b) Aletas NO Compactas

$$M_{PLT} = C_b * \left[ M_{pY} - (M_{pY} - 0,70 * F_y * S_y) * \left( \frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rt} - \lambda_{pf}} \right) \right] \leq M_{PLASTICO}$$

c) *Aletas esbeltas*

$$M_{PLT} = F_{CR} * S_y \leq M_{PLASTICO}$$

$$F_{CR} = \frac{0,69 * E}{\left(\frac{b}{t_f}\right)^2}$$

En caso de existir momentos torsores se debe relacionar el momento actuante sobre el eje mayor y sobre el eje menor. Es importante tener en cuenta que si existen fuerzas axiales considerables se debe tener en cuenta.

$$\text{Momento Permisible de diseño} = \frac{M_{ux}}{\Phi_b * M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{0,5 * \Phi_b * M_{ny}} \leq 1$$

Se debe determinar el ángulo de rotación de la viga debido a que ángulos muy altos genera deformaciones verticales altas, por lo tanto se debe verificar que no supere 1°.

### 6.10.2.3 **Calculo de vibraciones de piso.**

Las vibraciones que se generan en las estructuras metálicas son de alta importancia debido a que pueden generar ruidos, y sensaciones incómodas que afectan la comodidad del usuario. Ver Capítulo 12 (*Structural Steel Design, Abi Aghayere*).

El cálculo de las vibraciones de piso se basa principalmente en la relación de la estructura metálica Vs Piso que influye en la deformación total del conjunto que su vez genera vibraciones (Frecuencia Natural) que pueden ser comparables.

1. Para el cálculo de vibraciones se debe calcular el largo efectivo:

$$B_{eff} = 0,4 * L_j \geq B_D$$

Se escoge el menor entre el Beff y Bd.

$$B_{eff} = 0,4 * L_g \geq B_p \quad \text{Se escoge el menor entre } B_{eff} \text{ y } B_p.$$

2. Se determina el Ratio Dinámico.

$$n = \frac{E_{steel}}{E_{xx}}$$

3. Se debe definir si el factor de (n) está asociado a la fibra de vidrio o al acero para luego convertir la longitud efectiva  $B_{eff}$ :

$$b_e = \frac{B_{eff}}{n}$$

4. Se debe determinar el centroide de la viga y el piso siendo  $B_e$  la distancia longitudinal; se determinar la inercia general del elemento.

$$\bar{y} = \frac{\sum Ay}{\sum A}$$

$$I_{compj\acute{o}g} = \sum I + Ad^2$$

5. Se determina las deformaciones de los traveses y de las vigas.

$$\Delta_j = \frac{5 * w * L_j^4}{384 * E * I_{compj}}$$

$$\Delta_g = \frac{5 * w * L_g^4}{384 * E * I_{compg}}$$

6. Luego de definir las deformaciones de cada uno de los elementos, se calcula la masa actuante en cada uno de los elementos (Nervios y traveses).

- a. Nervios:

$$W_j = \gamma * w_j * B_j * L_j$$

$$B_j = C_j * \left(\frac{D_s}{D_j}\right) L_j^{0,25} \leq \frac{2}{3} \text{Longitud total del edificio } \perp \text{ nervios}$$

$$C_j = 2,0$$

$$D_s = \frac{d_e^3}{n}$$

$$D_j = \frac{I_{comp_j}}{S}$$

b. Trabes:

Se debe revisar que  $B_j$  no sea mayor que  $L_g$  en caso de serlo se debe proseguir con la siguiente corrección de la deformación.

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} * \Delta_g \geq 0,5\Delta_g$$

En caso de que requiera la corrección.

$$W_g = w_g * B_g * L_g$$

$$B_g = C_g * \left(\frac{D_j}{D_g}\right)^{0,25} \leq \frac{2}{3} \text{Longitud total del edificio paralelo a nervios}$$

$$C_g = 1,8$$

$$D_g = \frac{I_{comp_g}}{L_j}$$

7. Se calcula W total.

$$W = \left(\frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g}\right) W_j + \left(\frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g}\right) W_g$$

8. Se Calcula la frecuencia natural.

$$F_n = 0,18 * \sqrt{\frac{g}{\Delta_{viga} + \Delta_{Trabe}}} \text{ Frecuencia natural}$$

**Validación 6:  $F_n > 3\text{Hz}$**

9. Se busca en la tabla (Adjunta) P0, Beta, A0/g y se valida que la frecuencia obtenida no supere los rangos de vibraciones producidas por el zapateo al caminar.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o e^{(-0,35 * F_n)}}{\beta * W} * 100\% \leq \frac{a_o}{g}$$

Tabla 22: Frecuencias generadas al caminar.

Tabla Frecuencia Caminar			
Occupancy	Po	beta	ao/g*100
Oficinas, residencias	65	0,02	0,5
Mall	65	0,01	1,5

10. En caso de que la frecuencia natural  $F_n$  sea mayor que 9 Hz se debe realizar otro procedimiento de validación no incluido en este documento.
11. Al comprobar que las vibraciones por zapateo son aceptables se debe revisar que las vibraciones por actividades como saltar o correr no genere alteraciones de importancia.

$$F_{n \text{ requerida}} \geq f_f * \sqrt{1 + \frac{k}{a_o/g} * \frac{\alpha_i * w_p}{w_t}}$$

Tabla 23: Armónicos de vibración.

Tabla Armónicos				
Occupancy	ff	Wp	alfa_i	k
Bailar	1,5-3,0	12,5	0,5	1,3
Saltar i=1	2-2,75	4,2	1,5	2
Saltar i=2	4-5,5		0,6	
Saltar i=3	6,0-8,25		0,1	

*Donde:*

*Delta= Deformación o flecha de la viga j o trabe g (in).*

*g= gravedad 386 (in/s<sup>2</sup>).*

*Beta= Damping Radio*

*Po= constante de fuerza (Lb)*

*ao/g= límite de aceleración*

*Lj= longitud del nervio (in)*

*Lg= longitud del trabe (in)*

*Bd= espaciamento dado entre nervios (in).*

*Bp= espaciamento entre trabes (in).*

*E= módulo de elasticidad del acero 29,000.000 Psi.*

*E<sub>xx</sub>= módulo de elasticidad del material. (Psi).*

*be= longitud efectiva de cada uno de los elementos a cargar (in).*

*A= área de la sección (in<sup>2</sup>)*

*y= distancia del centroide de cada sección (in).*

*Y<sub>barra</sub>= centroide del piso y de la viga (in).*

*I= inercia de cada elemento (in<sup>4</sup>)*

*I<sub>comp</sub>= inercia del piso + perfil (in<sup>4</sup>).*

*γ= 1,0 ó 1,5 cuando el nervio es igual o mayor al 70% del largo del trabe.*

*w<sub>j</sub>= carga muerta más viva correspondiente al nervio (lbf)*

*w<sub>g</sub>= carga muerta más viva correspondiente al trabe (lbf).*

*de= espesor efectivo del piso (in)*

*S= espaciamento de nervios.*

### 6.10.3 CALCULO DE COLUMNAS

Para el cálculo de columna es importante definir las condiciones de carga que debe soportar cada columna (Ver numeral F.1), cada columna se debe tomar los momentos en cada eje, la carga axial presente y los cortantes y torsores actuantes. Debido que las columnas para el anteproyecto son proyectadas en tubería PTEC el procedimiento de cálculo está contemplado como:

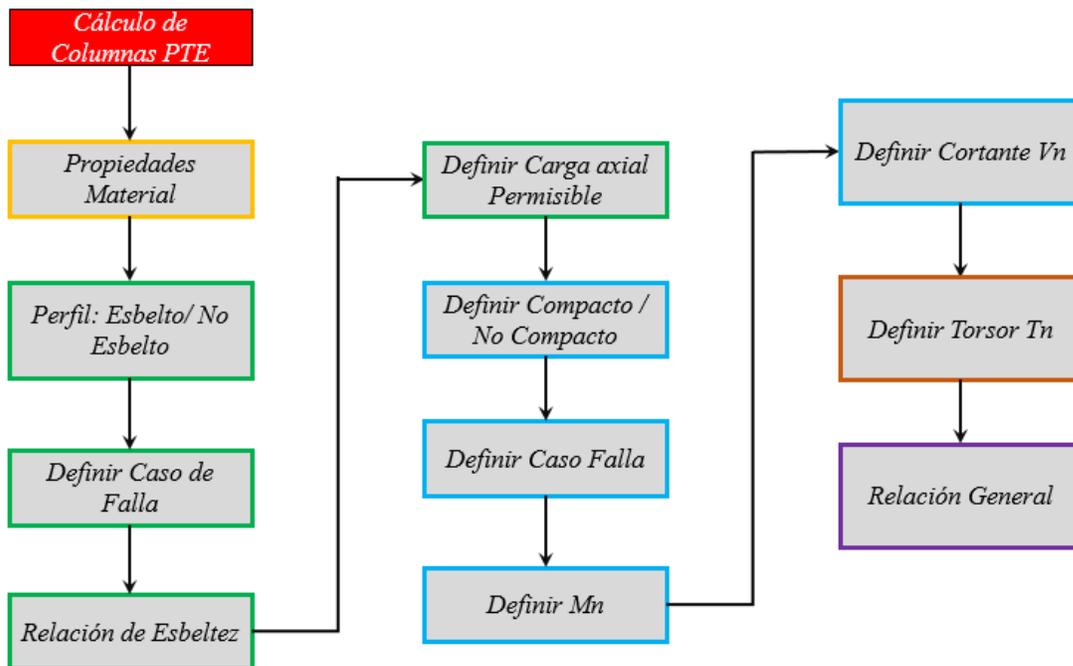


Ilustración 78: Procedimiento cálculo columnas (Autoría propia).

#### 6.10.3.1 Propiedades del material

Se debe especificar todas las propiedades pertenecientes al material y el perfil inicialmente escogido, entre ellos encontramos:

Tabla 24: Propiedades básicas de columnas.

Módulo de Elasticidad (E)	Módulo de sección X (Sx)	Altura Total Perfil (H)
Esfuerzo de Fluencia (Fy)	Módulo de sección Y (Sy)	Base total Perfil (B)
Inercia X (Ix)	Módulo Plástico X (Zx)	Altura centroide Alas (ho)
Inercia Y (Iy)	Módulo Plástico Y (Zy)	Espesor patín (t)
Radio de giro X (rx)	Módulo torsional (J)	Radio redondeos (r)
Radio de giro Y (ry)	Longitud Columna (Lb)	Area Brutal (Ag)
Constante Esbeltez (K)	Excentricidad X (ex)	Excentricidad Y (ey)

### 6.10.3.2 Definir tipo de perfil elementos a compresión.

Para el diseño de las columnas PTEC se debe tener en cuenta la relación existe entre las cargas actuantes axiales a compresión y los momentos actuantes que son representados en dos planos ortogonales entre sí. Se debe definir si el perfil se esbelto o No esbelto Ver F-46 Titulo F.

$$\text{Si } \frac{H - 2 * r}{t} \leq 1,4 \sqrt{E/F_y} \text{ No Esbelto}$$

$$\text{Si } \frac{H - 2 * r}{t} > 1,4 \sqrt{E/F_y} \text{ Esbelto}$$

### 6.10.3.3 **Caso de Falla.**

Para este caso de cálculo se definió que los perfiles PTEC eran No esbeltos, por lo tanto fallan por pandeo por flexión *Ver F-46 Título F.*

### 6.10.3.4 **Relación de Esbeltez.**

La relación de esbeltez es muy importante para el cálculo estructural, debido que la constante de esbeltez (K) amplifica o reduce el factor afectando inversamente proporcional la resistencia al pandeo por flexión de la estructura. El factor se define como  $KL/r_x$  y como  $KL/r_y$ .

Donde

$K = 0,65$  para elementos empotrados-empotrados sin traslación.

$K = 0,80$  para elementos Empotrados-Articulados sin traslación.

$K = 1,0$  para elementos articulados-articulados sin traslación.

$K = 1,2$  para elementos empotrados- empotrados con traslación.

$K = 2,1$  para elemento empotrados-libre extremo.

$K = 2,4$  para elementos articulados-empotrados con traslación.

### 6.10.3.5 **Carga Axial Permisible:**

La carga permisible se estable dependiendo la relación de esbeltez que se presenta en el elemento tipo columna. *Ver F-47 Título F:*

$$P_{\text{Permisible}} = F_{cr} * A_g$$

$$\text{Si } \frac{KL}{r} \geq 4,71 * \sqrt{E/F_y}$$

$$F_{cr} = \left[ 0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] * F_y$$

$$\text{Si } KL/r > 4,71 * \sqrt{E/F_y} \quad F_{cr} = 0,877 * F_e$$

Donde:

$$F_e = \frac{(\pi^2 * E)}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

Validación 1: **Ppermisible** > **Psufrido**

### 6.10.3.6 Definir perfil Compacto / No Compacto

Debido a que las columnas están sometidas a momentos en varios ejes se comporta como una Columna-Viga, por lo tanto la flexión ocasionada por los momentos actuantes debe ser considerada. El procedimiento de cálculo es similar al realizado en la sección I.1 Calculo de vigas Ver F-36 Titulo F.

$$\frac{b}{t} < 1,12 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{Compacto}$$

$$1,12 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,40 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{No Compacto}$$

$$\frac{b}{t} > 1,40 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{Esbelto}$$

### 6.10.3.7 **Definir Caso de Falla:**

El caso de falla se define según la sección *Ver F-58 Titulo F* donde para un perfil PTEC se define la falla por flexión, pandeo local de aleta y pandeo local de alma, sin importar si los elementos son compactos, no compactos o esbeltos.

### 6.10.3.8 **Definir Momento permisible:**

En cada plano de flexión debe haber 2 momentos que actúan en cada extremo de la columna, a partir de éstos se puede calcular momento resultante para cada plano, estos momentos resultantes se dan por la suma algebraica de los momentos que actúan en su respectivo plano, para cada uno de estos momentos resultantes es necesario definir el máximo momento permisible. Es importante saber que los momentos que actúan en cada extremo de la columna siempre se generan perpendicularmente al plano de flexión. *Ver F-68 Titulo F*

Se debe escoger el menor momento permisible obtenido.

#### Momento plástico:

$$M_{Permisible} = Mn = M_{plastico} = F_y * Z$$

#### Pandeo local de aleta:

- a) Si la sección es compacta no aplica pandeo lateral de aleta.
- b) Si la sección es no Compacta:

$$M_{Permisible} = Mn = M_{plt} = M_{plastico} - (M_{plastico} - F_y * S) * (3,57 * \frac{b}{t} * \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4,0)$$

- c) Si la sección es esbelta:

$$M_{Permisible} = Mn = F_y * S$$

Pandeo local de alma:

- a) Para secciones compactas no se aplica pandeo local de aleta.  
 b) Para secciones No compactas:

$$M_{Permisible} = Mn = M_{plt} = M_{plast} - (M_{plast} - F_y * S) * (0,30 * \frac{b}{t} * \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 0,73)$$

**Validación 2: Mpermisible > Msufrido**

Se debe verificar este procedimiento estableciendo los momentos actuantes en los dos ejes principales del elemento.

**6.10.3.9 Definir Cortante de Columna:**

El cortante en las columnas PTEC se define con las mismas ecuaciones de diseño que los perfiles en I utilizados para el cálculo de vigas Ver F-77 título F.

a) Para  $\frac{h}{tw} \leq 1,10 * \sqrt{5 * E/F_y}$

$$Cv = 1,00$$

b) Para  $1,10 * \sqrt{5 * \frac{E}{F_y}} < \frac{h}{tw} \leq 1,37 * \sqrt{5 * E/F_y}$

$$Cv = \frac{1,10 * \sqrt{5 * E/F_y}}{h/t}$$

c) Para  $\frac{h}{tw} > 1,37 * \sqrt{5 * E/F_y}$

$$Cv = \frac{5,51 * E}{\left(\frac{h}{t}\right)^2 * F_y}$$

$$V_{\text{Permisible}} = V_n = 0,60 * F_y * 2 * (H - 2 * Reond) * t * Cv$$

Donde:

$h$  = Es el ancho de la cara que resiste el esfuerzo cortante sin los redondeos.

Validación 3:  $V_{\text{permisible}} > V_{\text{sufrido}}$

#### 6.10.3.10 Definir Torsores actuante:

Se debe tener mucho cuidado al definir los torsores actuantes, debido a que las columnas pueden estar arriostradas en puntos donde pueden generar un momento torsor; el diseño de las columnas del anteproyecto no se generaron torsores adicionales a los producidos por el desplazamiento de deriva. Los torsores permisibles para PTEC se definen en la sección *F-85 Título F*.

$$a) \text{ Para } \frac{h}{t} \leq 2,45 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0,6 * F_y$$

$$b) \text{ Para } 2,45 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t} \leq 3,07 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0,6 * F_y * \frac{\left( 2,45 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right)}{\left( \frac{h}{t} \right)}$$

$$c) \text{ Para } 3,07 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t} \leq 260$$

$$F_{cr} = 0,6 * E * \frac{\pi^2}{\left(\frac{h}{t}\right)^2}$$

$$C = (B - t) * (H - t) * t - 4,5 * (4 - \pi) * t^3$$

$$T_{permisible} = T_n = F_{cr} * C$$

Validación 4:  $T_{permisible} < T_{sufrido}$

#### 6.10.3.11 Definir relación general:

La relación general para perfiles PTEC se establece en la sección *Ver F-86 Título F* donde relaciona las reacciones sufridas y permisibles de las fuerzas axiales, momentos flectores, cortantes y torsores.

$$\left(\frac{P_u}{\phi * P_n} + \frac{M_u}{\phi_b * M_n}\right) + \left(\frac{V_u}{\phi_v * V_n} + \frac{T_u}{\phi_T * T_n}\right)^2 < 1,0$$

#### 6.10.4 CONEXIONES PERNADAS DE LA EDIFICACIÓN.

Para el cálculo de las uniones pernadas se tiene en cuenta la sección *F118 Título F*, la cual establece los parámetros para el cálculo. Debido a que las uniones no son modeladas en el programa de simulación es muy importante definir los puntos en los cuales serán medidas las cargas sufridas, evaluando las envolventes de cada uno de los elementos. Para el cálculo se tienen en cuenta pernos A325 y A325M. En caso de utilizar otro tipo de pernos de alta resistencia se puede seguir el mismo procedimiento.

Es importante resaltar que las conexiones que se vayan a realizar, deben ser conexiones avaladas y estandarizadas por la AISC.

Se realiza el siguiente procedimiento para el cálculo

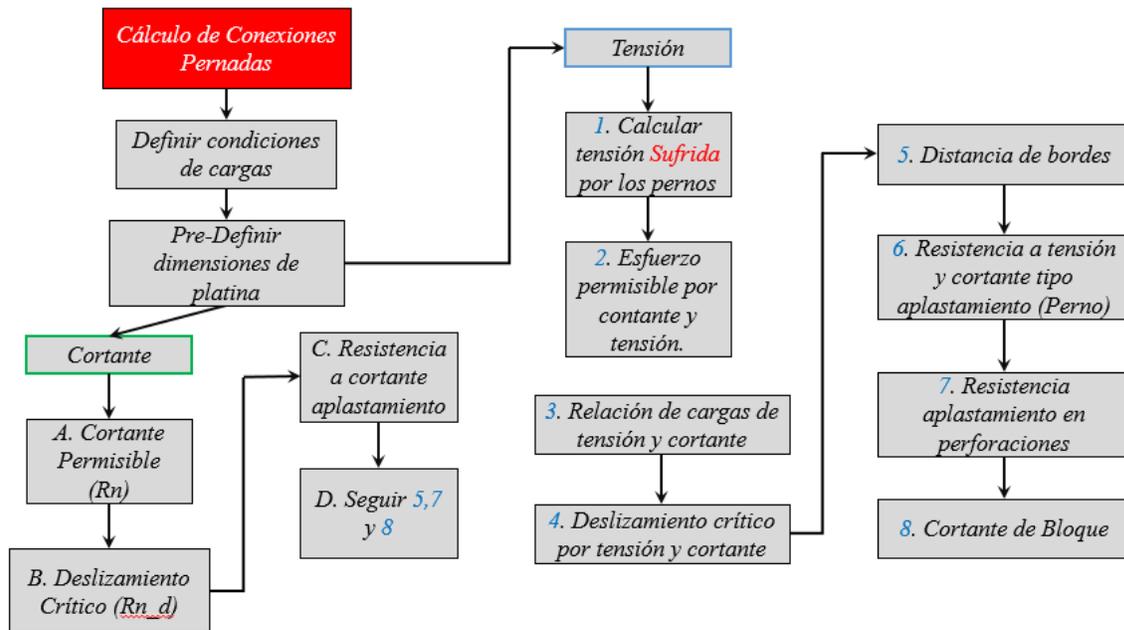


Ilustración 79: Diagrama cálculo de pernos .

#### 6.10.4.1 Unión viga en H del perímetro:

La conexión de este elemento se encuentra en el 20% de la longitud total de la viga, el tipo de conexión debe ser capaz de soportar los momentos y las cargas cortantes que se presentan así mismo, en las placas de conexión.

Debido que la conexión que se va a realizar para unir dos perfiles es por medio de placas soldadas paralelas a la sección transversal de cada perfil, se debe tener en cuenta que las perforaciones no estén sobre el perfil.

Para este caso en particular, los pernos están bajo un efecto de carga cortante producido por las reacciones verticales presentes en la viga y por un efecto de tensión producido por el momento presente en la junta. El procedimiento se describe a continuación:

**1. Predefinir la geometría de la platina:**

Se debe predefinir los diámetros de los pernos, las distancias entre ellos.

**2. Se calcula la fuerza de tensión producida por el momento actuante en cada uno de los pernos.**

$$M_{Eje\ neutro} = \#fila * Rut * [(d_{\perp}) + (d_{\perp}) + \dots + (d_{\perp})]$$

$$M_{aplicado} = Pu * e + M_{reacción}$$

$$M_{aplicado} = M_{Eje\ neutro}$$

$$Rut = \frac{M_{aplicado}}{\#fila * \sum d_{\perp}}$$

Donde:

*M<sub>eje neutro</sub>* = Momento en el eje neutro (N.mm)

*M<sub>aplicado</sub>* = Momento aplicado por excentricidad de carga cortante (N.mm)

*e* = excentricidad al borde de cara cortante (mm)

*P<sub>u</sub>* = Carga por m cortante en el perno (N)

*#fila* = número de filas de pernos (N)

*DL* = distancia de cada perno perpendicular al eje neutro (mm)

*Rut* = fuerza aplicada en el perno más alejado por tensión (N)

**3. Se calcula el esfuerzo permisible por cortante y por tensión.**

$$R_{Cortante} = R_n \phi = \phi * F_{nv} * A_b$$

$$R_{Tension} = R_n \phi = \phi * F_{nt} * A_b$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$F_{nv}$  = Resistencia a cortante en aplastamiento del perno (MPa)

$F_{nt}$  = Resistencia a tensión (MPa)

$A_b$  = Área del perno (Se debe suponer el área nominal) (mm<sup>2</sup>)

Ver página F-122 título F (NSR-10).

**4. Validar la relación de las cargas a tensión y a cortante (Validación 1).**

$$\left( \frac{V_u}{(\phi R_n)_v} \right)^2 + \left( \frac{R_{ut}}{(\phi R_n)_t} \right)^2 \leq 1$$

Ecuación LFRD 4.2 del RCSC

Donde:

$$R_{nt} = F_{nt} * A_b \text{ (N)}$$

$$R_{nv} = F_{nv} * A_b \text{ (N)}$$

$F_{nt}$  = Resistencia a la tensión de un perno sin contar área roscada (MPa)

$A_b$  = Área del perno sin área roscada (mm<sup>2</sup>)

$F_{nv}$  = Resistencia al cortante por aplastamiento (MPa)

$V_u$  = Cortante sufrido por cada perno (N).

$R_{ut}$  = Tensión sufrida por cada perno (N).

**Revisar deslizamiento crítico por tensión y cortante:**

Debido a que la formula define la cantidad total de pernos utilizados se debe comparar con la carga cortante total en la junta. Ver página F-123 título F (NSR-10).

$$R_{str} \phi * K_{sc} = \phi * 1,13 * \mu * T_m * N_b * N_s * \left[ 1 - \left( \frac{R_{ut}}{D_u * T_m} \right) \right]$$

Donde:

$\phi = 1,0$  ó  $0,85$  si es ranura.

$\mu$  = Coeficiente de fricción estática [0,10-0,33]

$T_m$  = Mínima tensión de apriete de pernos (N)

$N_s$  = Número de planos de corte (1 ó 2)

$N_b$  = Número de pernos (1)

$D_u = 1,13$

$N_b$  = Número de pernos que soportan la tensión.

Validación 2: **Rstr  $\phi$  < Vsufrido**

### 5. Dimensionamiento de Placa (**Validación 3**):

$L_e = 1,25$  a  $1,75$  el diámetro del agujero (mm).

Paso (P) = 3 el diámetro del perno (mm).

Paso Max (Pm) = 12 el diámetro de perno (mm).

### 6. Resistencia a tensión y cortante tipo en conexiones tipo aplastamiento:

$$\phi * R_{n_{Aplastamiento_{tv}}} = \phi * F'_{nt} * A_b$$

Definir la resistencia requerida a cortante por unidad de área Fv

Donde:

$\phi = 0,75$

$$Fv = \frac{V/\text{perno}}{\text{Área Nominal}}$$

$$F'_{nt} = 1,3 * Fnt - \frac{Fnt}{\phi * Fnv} Fv \leq Fnt$$

Ver página F-123 título F (NSR-10).

Validación 4:  $Rn_{\text{aplastamiento}} \phi < V_{\text{sufrido/perno}}$

### 7. Resistencia al aplastamiento en las perforaciones.

Para los pernos los cuales  $L_c$  sea menor que dos veces el diámetro del perno entonces:

$$R_{nac} = \phi * (1,2 * L_c * t * Fu)$$

Si  $L_c$  es mayor que 2 veces el diámetro del perno, entonces:

$$R_{nal} = \phi * (2,4 * \emptyset * t * Fu)$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$L_c$  es la distancia libre entre el agujero y el borde de la platina.

$$L_c = L_e - \frac{\emptyset}{2}$$

Se define entonces la resistencia total a aplastamiento a las perforaciones con pernos.

$$R_{nTotal} = \# * (R_{nac}) + \#(R_{nal})$$

Ver página F-124 título F (NSR-10).

Validación 5:  $Rn_{total} \phi < V_{sufrido}$ 

**8. Definir resistencia al cortante de bloque:**

$$R_A = \phi * (0,6 * Fy * A_{gr} + Fu * A_{nt})$$

$$R_B = \phi * (0,6 * Fu * A_{nv} + Fy * A_{gt})$$

Ver página F-126 título F (NSR-10).

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$A_{gv}$  = Área bruta a cortante ( $mm^2$ ).

$A_{nv}$  = Área neta a cortante ( $mm^2$ ).

$A_{gt}$  = Área bruta a tensión ( $mm^2$ ).

$A_{nt}$  = Área neta a tensión ( $mm^2$ ).

 Validación 6:  $Ra$  y  $Rb > V_{sufrido}$ 

**6.10.4.2 Uniones de columnas tipo PTEc por platina base.**

El modo de unión de las columnas PTEc se realizarán por medio de placas base pernadas utilizando elementos A325. El modelo de cálculo se realiza utilizando el mismo procedimiento anterior descrito en el cálculo de las uniones para perfiles en H.

### 6.10.4.3 **Uniones de nervios en I al sistema de entrepiso.**

Para el cálculo de los pernos es importante definir que el modo de conexión de los nervios con el trabe perimetral es un sistema articulado por lo tanto no generarán momentos sobre las juntas; a pesar de esta suposición se tendrán en cuenta algunos momentos de control.

Debido a que al sistema de unión no genera momentos, el sistema se calcula a cortante pura.

#### **1. Establecer cortante permisible.**

$$R_{Cortante} = R_n \phi = \phi * F_{nv} * A_b$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$F_{nv}$  = Resistencia a cortante en aplastamiento del perno (MPa)

$A_b$  = Área del perno (Se debe suponer el área nominal) (mm<sup>2</sup>)

Ver página F-122 título F (NSR-10).

Validación 1: **Rcortante < Vsufrido/perno**

#### **2. Establecer deslizamiento crítico por cortante.**

$$R_{Deslizamiento-Critico} = R_{str} \phi = \phi * 1,13 * \mu * T_m * N_b * N_s$$

Donde:

$$\phi = 1,0 \text{ ó } 0,85 \text{ si es ranura}$$

$\mu$  = Coeficiente de fricción estática [0,10-0,33]

$T_m$  = Mínima tensión de apriete de pernos (N)

$N_s$  = Número de planos de corte (1 ó 2)

$N_b$  = Platinas de relleno (1 ó 0,85)

Ver página F-123 título F (NSR-10).

Validación 2: **Rdeslizamiento-critico** < **Vsufrido**

**3. Revisar punto 6, 8 y 9 del cálculo anterior.**

**6.10.5 CONEXIONES SOLDADAS DE LA EDIFICACIÓN.**

**6.10.5.1 Nervios:**

El sistema de nervios en cada uno de los entresijos es un entramado con una configuración horizontal y verticalmente. Este sistema posee dos tipos de conexión por soldadura:

**1. Unión Nervio - Trabe perimetral:**

Consiste en una platina en L la cual se encuentra soldada en el trabe perimetral utilizando una soldadura tipo filete, para ser unido al nervio por medio de pernos. Este sistema se encuentra sometido a cortante por carga puntual, cortante por momento y a tensión.

Tensión Sufrida:

La fuerza por unidad de longitud se define como:

$$f_m = \frac{Pe}{S} = \frac{M}{S}$$

Donde:

*P*= Carga puntual aplicada (N).

*e*= Excentricidad (mm).

$S$  = Módulo de la sección de la soldadura (Ver libro Abi Aghayere).

$M$  = Momento resultante en la junta por excentricidad

Cortante y cortante por momento:

Cuando se trabajan uniones con solo cortante y con cortante por momento se realiza el siguiente procedimiento estipulado en el libro Abi Aghayere.

- Determinar centro de gravedad (Ver libro Abi Aghayere):
- Determinar momento polar de inercia  $I_p$  (Ver libro Abi Aghayere).
- Determinar la distancia del centro de gravedad al punto más remoto de soldadura (Ver libro Abi Aghayere).
- Determinar fuerza en unidad de longitud del cortante directo.

$$r_{px} = \frac{P_x}{L}$$

$$r_{py} = \frac{P_y}{L}$$

Donde:

$P_x$  = Fuerza cortante en  $x$  (N).

$P_y$  = Fuerza cortante en  $y$  (N).

$L$  = Longitud total de la soldadura (mm).

$r_{px}$  = Fuerza en unidad de longitud (N/mm).

$r_{py}$  = Fuerza en unidad de longitud (N/mm).

- Determinar esfuerzos por unidad de longitud debido a los cortante torsionales.

$$r_{mx} = \frac{P * e * cy}{I_p}$$

$$r_{my} = \frac{P * e * cx}{I_p}$$

- Determinar esfuerzo total a cortante:

$$f_p = r = \sqrt{(r_{px} + r_{mx})^2 + (r_{py} + r_{my})^2}$$

Donde:

$P$  = Componente total de la fuerza aplicada (N).

$cx$  = Distancia del centroide al punto más alejado de soldadura en x (mm).

$cy$  = Distancia del centroide al punto más alejado de soldadura en y (mm).

$I_p$  = Inercia polar obtenida en tablas de soldadura ver libro Abi Aghayere (mm)

$r$  = Cortante resultante de diseño (N/mm).

Se determina entonces el esfuerzo total de diseño por tensión y cortante:

$$f_{diseño} = \sqrt{f_p^2 + f_m^2} \text{ Fuerza/Long sufrida en la unión.}$$

El diseño de cada uno de las conexiones se realizará teniendo en cuenta en que la soldadura debe fallar primero que el material. Por lo tanto se debe verificar que la resistencia de la soldadura sea menor que la resistencia del material en la unión.

- Determinar la resistencia  $R_n$  de la soldadura en filete.

$$\phi R/long = 0,75 * 0,707 * 0,6 * w * F_{EXX}$$

$$w \gg \frac{f_{diseño}}{0,75 * 0,707 * 0,6 * F_{EXX}}$$

Donde:

$w$  = ancho de soldadura (mm)

$F_{exx}$  = Resistencia ultima de la soldadura a tensión (MPa).

- Se debe validar que la unión no falle por el material.

- **Fluencia del material:**

$$\phi * R_n = \phi * F_y * A_g$$

Donde:

$$\phi = 0,9$$

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia de tensión del material (MPa).

$A_g$  = Área bruta (mm<sup>2</sup>).

Validación 1:  $\phi R_n > f_{sufrido}$

- **Ruptura de material:**

$$\phi * R_n = \phi * F_u * A_n * U$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$F_u$  = Esfuerzo de ultimo de tensión del material (MPa).

$A_n$  = Área neta (mm<sup>2</sup>).

$U$  = Factor cortante de retraso (Ver titulo F).

Validación 2:  $\phi R_n > f_{sufrido}$

○ **Fluencia del material a cortante:**

$$\phi * Rn = \phi * 0,6 * Fy * Agv$$

Donde:

$$\Phi = 1,0$$

$Fy$  = Esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$Agv$  = Área a cortante ( $mm^2$ ).

Validación 3:  $\phi Rn > fsufrido$

○ **Ruptura del material a cortante:**

$$\phi * Rn = \phi * 0,6 * Fu * Anv$$

Donde:

$$\Phi = 0,75$$

$Fy$  = Esfuerzo de ultimo del material (MPa).

$Anv$  = Área neta a cortante ( $mm^2$ ).

Validación 4:  $\phi Rn > fsufrido$

○ **Bloque cortante (Validación 5):**

$$\begin{aligned} \phi * Rn &= \phi * (0,6 * Fu * Anv + U_{bs} * Fu * Ant) \\ &\leq \phi * (0,6 * Fy * Agv + U_{bs} * Fu * Ant) \end{aligned}$$

Donde:

$$\Phi = 0,75$$

 Validación 5:  $\phi R_n > f_{sufrido}$ 

## 2. Unión Nervio – Nervio:

Consiste en la unión de los nervios entre utilizando sus almas para la conexión; este modo de conexión es a cortante pura y por tensión; se realiza con una soldadura tipo filete.

### Cortante:

La carga/long actuante por cortante se obtiene por:

$$f_p = P/L$$

### Tensión:

La carga/long actuante por tensión se obtiene por:

$$f_m = M/S$$

El esfuerzo por unidad de longitud de diseño se calcula:

$$f_{diseño} = \sqrt{f_p^2 + f_m^2} \text{ Esfuerzo/Long de diseño}$$

El ancho necesario para soportar la carga se obtiene por:

$$w \gg \frac{f_{diseño}}{0,75 * 0,707 * 0,6 * F_{EXX}}$$

## 3. Unión placa a trabe perimetral.

Esta placa está completamente soldada a los perfiles estructurales de los travesaños, debido a esto se considera que ejerce tensión y cortante puro como el caso de la unión nervio – nervio.

#### **4. Unión trabe perimetral a columna:**

La unión se realiza por soldadura continua, debido a que la unión es resistente a momento la soldadura funciona a tensión y a cortante. El procedimiento se realiza igual al caso de Nervio – Nervio.

#### **5. Unión travesaños perimetrales ]]:**

Esta unión se realiza con un cordón continuo en medio de los perfiles en C, este cordón sufre fuerzas a cortante pura y momento cortante.

#### **6. Unión base columna a placa base:**

La unión se realiza por soldadura continua tipo filete, esta unión está sometida a tensión, cortante simple y momento cortante por torsión.

#### **7. Unión de nervaduras de soporte de estructuras tipo columnas:**

Las nervaduras trabajan a tensión y a cortante debido a los momentos y esfuerzos cortantes presentes en las uniones principales.

#### **Recomendaciones para el diseño de soldadura:**

- Al momento de soldar se debe recordar que la soldadura se puede contraer típicamente 1/8 de pulgada, por lo tanto las uniones de precisión pueden estar afectadas.
- Las conexiones a tensión, la longitud de la soldadura no debe ser menor, que la distancia perpendicular entre soldaduras.

- La longitud máxima de soldadura debe ser menor a 100 veces el ancho de la soldadura.
- Para las platinas de espesor menor que  $\frac{1}{4}$  pulgada el ancho máximo de la soldadura debe ser de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.
- Para las platinas de espesor mayor a  $\frac{1}{4}$  el ancho máximo de la soldadura debe ser de  $\frac{1}{4} - \frac{1}{16}$  de pulgada.
- Para las platinas de espesor menor igual a  $\frac{1}{4}$ , el mínimo ancho menor de soldadura es de  $\frac{1}{8}$  pulgada.
- Para platinas de espesor entre  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  de pulgada, el espesor mínimo de soldadura es de  $\frac{3}{16}$  de pulgada.
- Para platinas de espesor entre  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de pulgada, el espesor mínimo de soldadura es de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.
- Para platinas de espesor mayor de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, el espesor mínimo de soldadura es de  $\frac{5}{16}$  de pulgada.

### 6.10.6 DIMENSIONAMIENTO DE PLATINAS DE SOPORTE.

Para el cálculo de las platinas de soporte de las conexiones se deben revisar bajo 5 principales parámetros:

*Ver capítulo F.2 título F (NSR-10).*

#### 6.10.6.1 **Resistencia de elementos a tensión:**

Fluencia por tensión en elementos de conexión

$$\phi R_n = 0,9 * F_y * A_g$$

*Donde:*

$$\Phi = 0,9.$$

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$A_g$  = Área bruta a tensión ( $mm^2$ ).

Validación 1:  $\phi R_n > P_u$  tensión sufrida

Rotura por tensión en elementos de conexión

$$\phi R_n = 0,75 * F_u * A_e$$

Donde:

$$\phi = 0,75.$$

$F_u$  = Esfuerzo último del material (MPa).

$$A_e = A_n = 0,85A_g.$$

$A_e$  = Área efectiva a tensión ( $mm^2$ ).

Validación 2:  $\phi R_n > P_u$  tensión sufrida

#### 6.10.6.2 Resistencia de elementos a cortante.

Fluencia por cortante en elementos de conexión

$$\phi R_n = 0,6 * F_y * A_{gv}$$

Donde:

$$\phi = 1,0.$$

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$A_{gv}$  = Área bruta sometida a cortante ( $mm^2$ ).

Validación 3:  $\phi R_n > V_{u\_sufrida}$

**6.10.6.3 Rotura por cortante en elementos de conexión**

$$\phi R_n = 0,75 * 0,60 * Fu * A_{nv}$$

Donde:

$$\Phi = 0,75.$$

$Fu$  = Esfuerzo último del material (MPa).

$A_{nv}$  = Área neta sometida a cortante ( $mm^2$ ).

Validación 4:  $\phi R_n > V_{u\_sufrida}$

**6.10.6.4 Resistencia al desgarramiento de bloque**

$$\phi R_n = 0,75 * (0,60 * Fu * A_{nv} + U_{bs} * Fu * A_{nt} \leq 0,6 * Fy * A_{gv} + U_{bs} * Fu * A_{nt})$$

Donde:

$$\Phi = 0,75.$$

$A_{nv}$  = Área neta sometida a cortante ( $mm^2$ ).

$A_{nt}$  = Área neta sometida a tensión ( $mm^2$ ).

$A_{gv}$  = Área bruta sometida a cortante ( $mm^2$ ).

Validación 5:  $\phi R_n > P_{u\_tensión\_sufrida}$

### 6.10.6.5 Resistencia de elementos a compresión

Las placas sometidas a fuerzas de compresión deben resistir el pandeo y la fluencia.

$$\frac{KL}{r} \geq 25$$

$$\phi R_n = 0,9 * F_y * A_g$$

Donde:

$$\Phi = 0,9.$$

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$A_g$  = Área bruta a tensión ( $mm^2$ ).

Validación 6:  $\phi R_n > P_u_{\text{compresión sufrida}}$

### 6.10.7 DISEÑO DE CONEXIONES PARA PTE CUADRADAS.

Las columnas que se van a utilizar en el proyecto tienen conexiones por soldadura a la cara de la columna las vigas ménsulas; por lo tanto es importante revisar que estas juntas no dañen, ni generen desgarramiento en la columna (*Revisar Título F- F136*).

Debido a que en la norma no especifican conexiones con vigas en I o H, estas fueron seccionadas para ser examinadas por secciones rectangulares independientes.

#### 6.10.7.1 Para conexiones en T o con platina transversal al eje de la columna bajo carga axial:

Se define la relación entre el ancho de la platina o patín Vs el ancho de columna.

$$\beta = \frac{B_p}{B}$$

1. Fluencia local de platina para cualquier valor de  $\beta$  **Validación 1)**:

$$\phi Rn = 0,95 * \left( \frac{10}{B} * Fy * t * Bp \leq Fyp * tp * Bp \right)$$

Donde:

$$\Phi = 0,95.$$

$Fy$  = Esfuerzo de fluencia de la columna (MPa).

$Fyp$  = Esfuerzo de fluencia de la platina (MPa).

$t$  = espesor de pared de columna (mm).

$tp$  = Espesor de platina (mm).

$Bp$  = Ancho de platina (mm).

$B$  = ancho de base (mm).

Se debe comparar con la fuerza axial presente en la junta combinado con el momento flector. Este cálculo no es obtenido de ningún libro si no por razonamiento propio.

$$F_{sufrido} = P_{t_a} + \frac{M_{actuante}}{((H - t)/2)}$$

2. Fluencia a cortante (Punzonamiento) cuando  $0,85B < Bp \leq B-2t$ . **Validación**

**2)**

$$\phi Rn = 0,95 * 0,6 * Fy * t * [2 * tp + 2 * Bep]$$

Donde:

$$\Phi = 0,95.$$

3. Fluencia local de la pared PTE, cuando  $\beta = 1$  **Validación 3)**

$$\phi R_n = 1,0 * 2 * F_y * t * [5 * k + t_p]$$

Donde:

$$\Phi = 1,0.$$

$K$  = Radio de columna (mm).

4. Arrugamiento de pared del PTE, para conexiones en T, cuando  $\beta=1,0$  y la platina está a compresión **Validación 4**.

$$\phi R_n = 0,75 * 1,6 * t^2 * \left[1 + \frac{3 * t_p}{H - 3 * t}\right] * \sqrt{E * F_y} * Q_f$$

Donde:

$$\Phi = 0,75.$$

$Q_f = 1,0$  para una superficie a tensión.

$Q_f = 1,3 - 0,4 * \frac{U}{\beta} \leq 1,0$  para una platina transversal a una superficie a compresión.

5. Arrugamiento de pared para conexiones en cruz o para relaciones  $\beta=1,0$  y la platina a compresión.

$$\phi R_n = 0,9 * \left[ \frac{48 * t^3}{H - 3 * t} \right] * \sqrt{E * F_y} * Q_f$$

Donde:

$$\Phi = 0,9.$$

6. Conexiones en T, en Y con platina longitudinal, bajo carga axial **Validación 5**.

Este estado de carga se aplica para el alma de la viga en I o H que estará conectada a la cara de la columna PTEc y que actúa una fuerza a tensión o compresión (Fluencia en la pared del PTE).

$$Rn = \frac{Fy * t^2}{1 - \left(\frac{t_p}{B}\right)} * \left[ \frac{2 * l_b}{B} + 4 * \sqrt{1 - \frac{t_p}{B}} * Q_f \right]$$

7. Conexiones en T con platina longitudinal de cortante bajo fuerza cortante en la platina. Fluencia en la platina y falla a cortante. **Validación 6**.

$$t_p \leq \frac{Fu}{Fyp} * t$$

### 6.10.8 CALCULO DE PLACAS BASE.

Para el cálculo de placas base es importante definir y entender el comportamiento que las placas bases, con el fin de que estas no sufran a flexión y compresión; adicional este capítulo estable el diseño de las placas soporte de las columnas.

#### 6.10.8.1 **Carga pura vertical:**

Para el pre dimensionamiento de la placa se realiza

$$t \geq l * \sqrt{\frac{2 * Pu}{0,9 * B * N * Fy}}$$

Donde:

*l* = Es la mayor distancia entre la pared del PTE y el borde de la placa (mm).

*Pu* = Carga vertical de columna (N).

*B* = Ancho de la placa (mm).

*N* = Largo de la placa (mm).

*Fy* = Esfuerzo de fluencia de la placa (MPa).

*Bf* = ancho de la columna (mm).

*d* = largo de la columna (mm).

**Nota:**

Tener en cuenta que  $B > bf + 100\text{mm}$ .

Tener en cuenta que  $N > d + 100\text{mm}$ .

**6.10.8.2 Carga de placa base por fuerza puntual y momento pequeño.**

Se refiere a momento pequeño cuando la placa base tiene la capacidad de distribuir a lo largo de toda su placa el esfuerzo sufrido debido a la carga vertical y el momento.

**1. Determinar el tamaño de placas:**

$$B \geq bf + 100\text{mm}$$

$$N \geq d + 100\text{mm}$$

**2. Determinar la excentricidad:**

$$e = \frac{Mu}{Pu} \leq \frac{N}{6} \text{Momento Pequeño}$$

Donde:

$e$ = Excentricidad (mm).

$Mu$ = Momento sufrido (N.mm)

$Pu$ = Fuerza axial de la columna (N).

$N$ = Ancho de placa (mm)

**3. Determinar la longitud fuerza de la columna m,n**

$$m = (N - d)/2$$

$$n = (B - bf)/2$$

**4. Pre dimensionar el espacio necesario para el concreto.**

$$Ac, \text{ m\u00ednimo} = (B + 2 * h_g) * (N + 2 * h_g)$$

Hg: Espesor del concreto (mm)

**5. Determinar la mínima y máximo esfuerzo a compresión.**

$$f_{u,min} = \frac{P_u}{B * N} - \frac{M_u}{\left(\frac{B * N^2}{6}\right)} \geq 0$$

$$f_{u,max} = \frac{P_u}{B * N} + \frac{M_u}{\left(\frac{B * N^2}{6}\right)} \leq 0,65 * (0,85 * f'c)$$

Donde:

$F'c$ = Esfuerzo de compresión del concreto (MPa).

**6. Determinar el máximo momento en la placa en el punto del perno:**

$$f_{u,m} = f_{u,min} + (f_{u,max} - f_{u,min}) * \frac{N - m}{N}$$

$$M_{u,m} = (f_{u,m}) * \frac{m^2}{2} + \frac{1}{2} * (f_{u,max} - f_{u,m}) * (m) * \left(\frac{2}{3} * m\right)$$

**7. Cuando el momento actuante máximo es igual al resistente se obtiene que el espesor de la placa debe ser:**

$$tp \geq \sqrt{\frac{4 * M_{u,m}}{\Phi_b * b_p * F_y}} + 1/8in$$

Donde:

$\Phi_b$ = 0,9

$b_p$ = 25,4 (mm).

$F_y$ = Esfuerzo de fluencia de placa (mm)

### 6.10.8.3 **Carga de placa base por fuerza puntual y momento grande.**

Se considera que el momento es grande cuando la carga se deja de distribuir sobre toda la placa y se concentra en una zona en especial de la placa aumentando los esfuerzos. Para el desarrollo de este cálculo se debe realizar el siguiente procedimiento.

1. **Determinar el Pu y Mu.**
2. **Determinar el aproximado B y N:**

$$B \geq bf + 100mm$$

$$N \geq d + 100mm$$

3. **Definir el espacio adicional de concreto para soportar la placa:**

$$Ac, \text{ mínimo} = (B + 2 * h_g) * (N + 2 * h_g)$$

Hg: Espesor del concreto (mm)

4. **Determinar la excentricidad e:**

$$e = \frac{Mu}{Pu} \geq \frac{N}{6} \text{ Momento Grande}$$

5. **Asumir que la distancia entre el perno a tensión a la cara de la placa a compresión en 0.9N. Pre-indicar las distancias de los pernos.**

$$h = 0,9 * N$$

6. **Definir el área total de los pernos que se encuentran en el área de tensión.**

$$Ab = \#_{pernos} * \pi * \frac{\phi^2}{4}$$

7. **Resolver las ecuaciones y obtener a y N:**

$$a = \frac{P_u + 0,75 * \phi_t * A_b * F_u}{0,85 * B * f'c * \phi_c}$$

$$N = \frac{h}{0,5} + \frac{M_u}{0,5 * P_u} - \frac{0,85 * \phi_c * f'c * B * a * \left(h - \frac{a}{2}\right)}{0,5 * P_u}$$

Donde:

$\phi_c = 0,65$ .

$\phi_t = 0,75$

$f'c$  = esfuerzo de compresión del concreto (MPa).

$P_u$  = fuerza sufrida por la columna (N).

$M_u$  = Momento sufrido por la columna (N).

$F_u$  = esfuerzo ultimo de tensión (MPa).

**8. Escoger el mayor N del punto 6 y 2.**

**9. Definir m y n.**

$$m = (N - d)/2$$

$$n = (B - bf)/2$$

**10. Definir el máximo momento y espesor por momento flector.**

$$M_u = (0,85 * \phi_c * f'c) * \frac{l^2}{2} [N \cdot mm/mm]$$

$$t_p = \sqrt{\frac{4 * M_u}{\phi_b * b_p * F_y}}$$

Donde:

$b_p = 1in$

$d$  = Ancho de la columna (mm).

$l$  =  $m$  ó  $n$  (mm)

**11. Determinar el momento flector en la base de la columna debido a la tensión de los pernos de anclaje.**

$$M_u = T_u * \frac{x}{B}$$

$$t_p = \sqrt{\frac{4 * T_u * x}{\Phi_b * B * F_y}}$$

Donde:

$X$  = La distancia del centroide del perno a la cara de la columna (mm).

$T_u$  = Tensión en el perno máxima =  $0,75 * \phi_t * A_b * F_u$

**El  $t_p$  es el mayor entre el punto 10 y el punto 11**

**12. Luego de realizar el dimensionamiento de la placa se debe revisar nuevamente las dimensiones, revisar que la longitud de los pernos sea la adecuada para ese tipo de unión.**

#### 6.10.8.4 **Dimensión del Concreto:**

Adicional al cálculo dimensional de la placa se debe revisar que el concreto donde va a apoyar la placa sea lo suficientemente resistente para soportar las cargas aplicadas; La norma NSR-10 establece:

La resistencia  $P_n$  de diseño del concreto es:

a)  $\phi P_p = 0,65 * 0,85 * f_c' * A_1 \rightarrow$  Cuando la placa se apoya en toda la superficie

$$b) \phi P_p = 0,65 * 0,85 * f'c * A_1 * \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 * F'c * A_1$$

→ Cuando la placa No se apoya en toda la superficie

#### 6.10.8.5 **Diseño de pernos de anclaje:**

Para el cálculo de los pernos se debe revisar la tensión del perno, la resistencia del concreto para evitar que el perno de anclaje se desacople y por cortante.

Ver capítulo F.2 título F (NSR-10).

##### 1. Resistencia por tensión:

$$\phi * R_n = (0,75 * \phi * A_b * F_u)$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$F_u$  = Esfuerzo ultimo del perno (MPa)

$A_b$  = Área efectiva del perno.

**Validación 1:  $P_u + M_u/e < \# * \phi * R_n$**

##### 2. Resistencia del Concreto:

$$\phi * R_n = \phi * \psi_4 * (0,9 * f'c * e_h * d_b)$$

Donde:

$$\phi = 0,7$$

$$\psi_4 = 1,0$$

$F'c$  = Resistencia del concreto (MPa).

$eh$ = Longitud de Hooke ( $3d < x < 4,5d$ ).

$db$ = Diámetro de perno (mm).

**Validación 2:  $P_u + M_u/e < \phi R_n$**

### 3. Resistencia al Cortante:

Aunque el libro no especifique este cálculo se debe realizar en caso de que la placa se deslice.

- Resistencia a cortante.

$$R_{Cortante} = R_n \phi = \phi * F_{nv} * A_b$$

Donde:

$F_{nv}$ = Resistencia a cortante del perno (MPa).

$A_b$ = Area efectiva del perno (mm<sup>2</sup>).

$$\phi = 0,75$$

### 4. Determinar deslizamiento Crítico

$$R_{Deslizamiento-Critico} = R_{str} \phi = \phi * 1,13 * \mu * T_m * N_b * N_s$$

#### 6.10.9 CONEXIÓN ESPECIAL, CORTE DE VIGA.

En la conexiones de nervio-trabe perimetral se requiere de un corte del nervio en el patín superior para su nivelación, por lo tanto los concentradores de esfuerzos deben ser tenidos en cuenta. Así mismo se le debe realizar cortes a ambos lados en la unión nervio-nervio debido a que están soldados por su alma. *Ver capítulo 11 página 487 (Structural Steel Design, Abi Aghayere).*

### 6.10.9.1 **Conexión Nervio-Trabe perimetral:**

El corte que se plantea es un corte en el patín superior, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son:

#### Resistencia a la Ruptura del material:

$$\phi_{br}Mn = \phi_{br} * Fu * S_{net}$$

Donde:

$$\phi_{br}=0,75$$

Fu= Esfuerzo último del material (MPa).

Snet= Módulo de sección neta de la zona cortada (mm<sup>3</sup>) = Inet/h1

#### Resistencia a la fluencia del material:

$$\phi_b Mn = \phi_b * F_{cr} * S_{net}$$

Para  $c < 2d$  y  $dc < 0,5d$

$$F_{cr} = 26210 * \left(\frac{tw}{h1}\right)^2 f * k$$

Donde:

F=Módulo de ajuste de pandeo

$$= 2*c/d \text{ cuando } c/d \leq 1,0$$

$$= 1+(c/d) \text{ cuando } c/d > 1,0$$

K=Coficiente de pandeo

$$= 2,2*(h1/c)^{1,65} \text{ cuando } c/h1 \leq 1,0$$

$$= 2,2*(h1/c) \text{ cuando } c/h1 > 1,$$

$h1$  = Altura del eje neutral de la pieza cortada.

$t_w$  = espesor del alma.

$c$  = Largo de Cope.

$d$  = Alto de la viga

$d_c$  = Ancho del corte de Cope.

### 6.10.9.2 **Conexión Nervio-Nervio:**

El corte que se plantea es un corte en el patín superior e inferior, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son:

$$\phi_b Mn = \phi_b * F_{cr} * S_{net}$$

Para  $c < 2d$  y  $d_c < 0,2d$

$$F_{cr} = 0,62 * \pi * E * \left( \frac{t_w}{c * h_o} \right)^2 f_d$$

Donde:

$$f_d = 3,5 - 7,5 * \left( \frac{d_c}{d} \right)$$

$$E = 29000000 \text{ psi}$$

$$S_{net} = \frac{I_{net}}{h1} \rightarrow S_{net} = \frac{t_w * h_o^2}{6} \text{ para un rectángulo}$$

**IMPORTANTE:**

1. El Mu actuante se considera como la carga puntual cortante Ru por la excentricidad existente entre la aplicación de la fuerza y el borde del corte o

$$\text{Cope. } \Phi_{br} * \mathbf{Mu} = \Phi_{br} * \mathbf{Ru} * e$$

2. Revisar el cortante permisible:

$$\Phi_v V_n = 0,9 * 0,6 * F_y * A_w * C_v$$

### 6.10.10 ARRIOSTRAMIENTO.

Ver capítulo F.2 título F (NSR-10).

Si el tipo de conexión son pernos:

#### 1. Resistencia a Tensión

$$\Phi P_n (\text{fluencia}) = 0,9 * F_y * A_g$$

$$\Phi P_n (\text{Última}) = 0,75 * F_u * U * A_g$$

Donde:

Ag: Área bruta a tensión (mm<sup>2</sup>)

Fy: Esfuerzo de fluencia (MPa)

Fu: Esfuerzo último (MPa)

U: Factor de rezago de cortante

#### 2. Determinar el área mínima requerida por tensión:

$$A_g, \text{ mínima1} = P_u / (0,9 * F_y)$$

$$A_g, \text{ mínima2} = (P_u / (0,75 * F_u * U)) + (\# \text{Perforaciones} * A_p)$$

Se escoge la mayor de las dos

$A_p$  = Área de una perforación (mm<sup>2</sup>)

Validación 1:  $A_g, \text{mín} > A_g$

### 3. Relación de esbeltez = $k \cdot L / r, \text{mín}$

K: Coeficiente de pandeo

L: Longitud de la riostra (mm)

R, mín: Radio de giro del eje débil (mm)

Validación 2: **Esbeltez > 300**

### 4. Revisar si la relación de esbeltez, para compresión, es menor a 200

### 5. Resistencia a la compresión:

$$F_e = (\pi^2) \cdot E / (k \cdot L / r, \text{mín})^2$$

$$F_{cr} = F_y \cdot \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) \quad \text{si } kL/r, \text{mín} \leq 4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$= 0,877 \cdot F_e \quad \text{si } kL/r, \text{mín} > 4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\Phi P_n \text{ diseño} = 0,9 \cdot F_{cr} \cdot A_g$$

E: Módulo de elasticidad (MPa)

F<sub>y</sub>: Esfuerzo de fluencia (MPa)

Validación 3:  $\Phi P_n > P_{u\_compresión}$

Si el tipo de conexión son pasadores:

### 1. Resistencia a Tensión

$$\Phi P_n (\text{fluencia}) = 0,9 \cdot F_y \cdot A_g$$

Validación 1:  $\Phi P_n > P_{u\_Tensión}$

### 2. Rotura por tensión

$$\Phi P_n = 0,75 \cdot 2 \cdot t_p \cdot (2t_p + 16) \cdot F_u$$

*Donde:*

$T_p$ : Espesor de la platina (mm)

$F_u$ : Esfuerzo último (MPa)

Validación 2:  $\Phi P_n > P_{u\_Tensión}$

### 3. Rotura por cortante:

$$\Phi P_n = 0,75 \cdot 0,6 \cdot F_u \cdot 2 \cdot t_p \cdot (a + 0,5 \cdot d)$$

$a$ : Distancia más corta entre el agujero y el pasador (mm)

$d$ : diámetro de la perforación (mm)

Validación 3:  $\Phi P_n > V_{u\_sufrida}$

#### 4. Resistencia por aplastamiento:

Para los pernos los cuales  $L_c$  sea menor que dos veces el diámetro del perno entonces:

$$R_{nac} = \phi * (1,2 * L_c * t * Fu)$$

Si  $L_c$  es mayor que 2 veces el diámetro del perno, entonces:

$$R_{nal} = \phi * (2,4 * \emptyset * t * Fu)$$

Donde:

$$\phi = 0,75$$

$L_c$  es la distancia libre entre el agujero y el borde de la platina.

$$L_c = L_e - \frac{\emptyset}{2}$$

Se define entonces la resistencia total a aplastamiento a las perforaciones con pernos.

$$R_{nTotal} = \# * (R_{nac}) + \#(R_{nal})$$

Validación 4:  $\Phi P_n > P_u_{Tensión}$

5. Se aplican los puntos 4 y 5 del caso de conexión tipo pernos.

## 6.11 RESULTADOS PRELIMINARES

Las formulas anteriores fueron programadas con el fin de facilitar y agilizar el proceso de cálculo y verificación. El proceso de cálculo se realizó teniendo en cuenta las cargas arrojadas por las envolventes de cada una de las combinaciones de cargas y fueron evaluadas en el sistema. Los resultados se arrojan en las siguientes ilustraciones.

CALCULO DE COLUMNAS PTE CUADRADAS			
<b>1. Propiedades Material PTE</b>			
Fy (MPa)	344		
E (MPa)	200000		
b (mm)	177,8		
h (mm)	177,8		
t (mm)	7		
redon (mm)	14		
rx (mm)	69,25288586		
ry (mm)	69,25288586		
Ix (mm <sup>4</sup> )	22330000		
Iy (mm <sup>4</sup> )	22330000		
Ag (mm <sup>2</sup> )	4656		
K	1		
L (mm)	3000		
Zx (mm <sup>3</sup> )	295430		
Zy (mm <sup>3</sup> )	295430		
Sx (mm <sup>3</sup> )	251180		
Sy (mm <sup>3</sup> )	251180		
<b>2. Característica del perfil</b>			
No esbelto			
<b>3. Caso de falla compresión</b>			
Pandeo Flexión			
<b>4. Relación de esbeltez</b>			
KL/rx	43,31949439	Cumple	
KL/ry	43,31949439	Cumple	
<b>5. Carga admisible Flexión sin</b>			
φc	0,9		
Fex (MPa)	1051,872214		
Fey (MPa)	1051,872214		
Fcr x	299,9934552		
Fcr y	299,9934552		
Pn x	1257092,574		
Pn y	1257092,574		
Pn Diseño	1257092,574	Cumple	
		Cumple	
<b>6. Calculo de momentos permisibles</b>			
Aletas			
b/t	19,4		
λp	27,00559804		
λr	33,75699755	Compacto	
Alma			
h/t	19,4		
λp	58,35138148		
λr	137,4392043	Compacto	
<b>6.1. Caso de falla a flexión</b>			
Flexión, Pandeo local de aleta y Pandeo local de alma			
<b>6.2 Caso de falla a flexión PTE</b>			
Mnx Plastico	101627920		
Mny Plastico	101627920		
Pandeo local de aletas			
Mnx PLA	No aplica		
Pandeo local de alma			
Mnx PLA	No aplica		
Mux Diseño	91465128	Cumple	
Muy Diseño	91465128	Cumple	
<b>7. Cortante PTE</b>			
φv	0,9		
Cv	1		
Vu Diseño	462393,792	Cumple	
<b>8. Torsión PTE</b>			
φt	0,9		
Fcr	206,4		
C	407092,0083		
Tu Diseño	75621411,45	Cumple	
<b>9 Carga de Columnas</b>			
Pu (N)	147000		
Mux Di (N.mm)	24076000		
Muy Di (N.mm)	19852000		
Vu (N)	10107		
Tu (N.mm)	3230000		
<b>10. Conclusión final</b>			
Iyc_aleta a compresión (mm <sup>4</sup> )	9082149,053	Son necesarios	
Iy (mm <sup>4</sup> )	22330000	estos datos	
		Cumple	

Ilustración 80: Cálculo de columnas (Autoría propia).

CÁLCULO DE VIGAS							
<b>1. Propiedades del Material</b>		45 WF5X16 400					
E (MPa)	200000						
Fy (MPa)	248						
Zx (mm <sup>3</sup> )	287000						
Zy (mm <sup>3</sup> )	31190						
Jy (mm <sup>4</sup> )	19,09411269						
Jx (mm <sup>4</sup> )	115,5824178						
Sy (mm <sup>3</sup> )	19470						
Sx (mm <sup>3</sup> )	244800						
J (mm <sup>4</sup> )	0						
Iy (mm <sup>4</sup> )	982009,3693						
Ix (mm <sup>4</sup> )	35983236,14						
Radio (mm)	8						
H (mm)	303						
B (mm)	101						
t (mm)	5,7						
tw (mm)	5,1						
Long Viga (mm)	12000						
Mmax (N.mm)	42246600						
Cmax (N)	33377,4						
R asiento (N)	91000						
ho (mm)	297,3						
h (mm)	275,6						
b (mm)	50,5						
<b>2. Características del perfil</b>		3000 6000 9000					
Elementos no atisados							
λ p	10,79						
λ r	28,40						
Relación h/t							
Elementos atisados							
λ p	102,23						
λ r	159,03						
Relación h/tw							
54,039							
<b>3. Tipo de falla</b>							
Falla F y PLI							
<b>4. Definir Ch</b>							
Ma (N.mm)	8804100						
Mb (N.mm)	7154700						
Mc (N.mm)	62300						
Rm	1						
Cb(teo)	3,28						
Cb(Diseño)	3,00						
<b>5. Definir Momento de diseño</b>							
qb	0,9						
Lb (mm)	1500						
Cw	21699286727						
rs	24,4						
E_vigal	1						
Fer (MPa)	1569,4						
Lp (mm)	954						
Lr (mm)	2606						
Mn_pht	185106266						
Mn_p	71176000						
Mn_Diseño (N.mm)	64058400	Cumple					
<b>6. Validar deflexión</b>							
Deflexión (mm)	1,7						
Lperm (mm)	1,7			Cumple			
<b>7. Definir cortante de diseño</b>							
φv	1,0						
Aw	1545,3						
Cv	1						
Vn_Diseño (N)	229940,64					Cumple	
<b>8. Definir rigidizadores</b>							
No requiere Rigidizadores							
kv	5						
<b>9. Soporte de apoyo y cargas concentradas</b>							
N (mm)	127						
L (mm)	13,7						
Rn_McCormac	133468			Cumple			
X (mm)	25						
Fluencia de Almn							
Rn_AbiAgh (N)	203949			Cumple			
Arregamiento de Almn							
φwc	0,75						
Rn_AbiAgh (N)	275904			Cumple			
Espesor de placa							
t_placa (mm)	2						
Ancho placa (mm)	102						
t_diseño (mm)	1,532290357	Cumple					
<b>10. Cálculo de la torsión</b>							
E (Psi)	29000000						
G (Psi)	21000						
J (in <sup>4</sup> )	0,00						
Largo de viga (in)	472						
Dv (in <sup>4</sup> )	2,4						
Sx (in <sup>3</sup> )	14,9						
ho (in)	11,7						
n	#DIV/0!						
Cw	11						
e (in)	1						
w (Kips/in)	1						
Muy (Kips.in)	#DIV/0!						
θ (rad)	#DIV/0!						
Muy (N.mm)	#DIV/0!	1600					
θ (Grados)	#DIV/0!						
Δ_Fachada (in)	#DIV/0!						
Δ_Fachada (mm)	#DIV/0!						
Mn_p (N.mm)	7725696						
Mn_pht (N.mm)	No Aplica						
Mn_Diseño (N.mm)	7725696	#DIV/0!					
Fer (MPa)	1758,1						
Cumple							
0,680985969							
<b>11. Cálculo de vibraciones</b>							
Largo efectivo							
Bd (in)	59						
Bp (in)	138						
li (in)	138						
lg (in)	236						
Beff_j (in)	55,2						
Beff_g (in)	94,4						
Beff_gDiseño	55,2						
Beff_gDiseño	94,4						
Ratio Dinámico							
E Steel (Psi)	29000000						
E Glass (Psi)	33356000						
n	1,150						
Longitud efectiva							
le_trabe (in)	108,6						
le_nervio (in)	63,5						
Determinar centroide							
Nervio							
t_piso (in)	1						
Ix_piso nervio (in <sup>4</sup> )	5,29						
Ix_Viga (in <sup>4</sup> )	86,5						
Ix_piso nervio (in <sup>2</sup> )	63,49						
A_viga (in <sup>2</sup> )	6,4						
h (in)	11,93						
Y_Barra (in)	11,84						
I_comp_nervio (in <sup>4</sup> )	8473,1						
Trabe							
t_piso (in)	1						
Ix_piso nervio (in <sup>4</sup> )	9,05						
Ix_Viga (in <sup>4</sup> )	86,5						
Ix_piso nervio (in <sup>2</sup> )	108,58						
A_viga (in <sup>2</sup> )	6,4						
h (in)	11,93						
Y_Barra (in)	12,07						
I_comp_trabe (in <sup>4</sup> )	14867,2						
Masas							
w_nervio (Lb/ft <sup>2</sup> )	10						
w_trabe (Lb/ft <sup>2</sup> )	20						
w_nervio (Lb/in)	33						
w_trabe (Lb/in)	40						
Deflexiones							
Deflexión Nervio (in)	0,0006						
Deflexión Trabe (in)	0,0037						
Deformaciones							
r	1						
S (ft)	5						
Dv (in <sup>4</sup> /ft)	1694,6						
Ds (in <sup>4</sup> /ft)	0,869						
Cj	2						
Largo_T_Planta_Per_nervios (ft)	12						
Bj (ft)	3,462	Cumple N					
Dj (in <sup>4</sup> /ft)	1694,6						
Ds (in <sup>4</sup> /ft)	1292,8						
Cj	1,8						
Largo_T_Planta_paralelo_n	7						
Bj (ft)	454,5	No Cumple T					
Deflexión Correpida (in)	0,255	Cumple					
Masa total							
W_nervios (Lb)	398,07						
W_trabe (Lb)	178785						
W_total (Lb)	178343						
Frecuencia natural							
fn (Hz)	7,0	Cumple 3Hz					
Cumple 9Hz							
<b>12. Tabla Frecuencia Caminar</b>							
Occupancy	Po			beta	ao/g*100		
Oficinas, residencias	65			0,02	0,5		
Mall	65			0,01	1,5		
Validación frecuencia al caminar							
Beta	0,02						
ap/g	0,1579			Cumple			
Validación frecuencia al saltar o correr							
ff 1	2,75			ff 2	5,5 ff 3		
Wp	4,2				8,25		
alfa 1	1,5	alfa 2	0,6 alfa 3				
			0,1				
ao/g	2						
art (psd)	66						
Armonico_1	14,62	Cumple					
Armonico_2	18,98	Cumple					
Armonico_3	13,85	Cumple					
<b>13. Tabla Armónicos</b>							
Occupancy	ff			Wp	alfa 1		
Balar	1,5-3,0			12,5	0,5		
Salar f=1	2-2,75				1,5		
Salar f=2	4-5,5			4,2	0,6		
Salar f=3	6,0-8,25				0,1		
<b>14. Tabla Relación Ao/g</b>							
Office Residential	0,004-0,007						
Drainage	0,015-0,025						
Rhythmic activity	0,04-0,07						

Ilustración 81: Cálculo de vigas (Autoría propia).



1. Datos		DISEÑO PLACA BASE		DISEÑO CONCRETO Y PERNOS	
<b>Placa</b>		<b>2. Predimensionamiento de placa por carga vertical</b>		<b>2. Resistencia por tensión en pernos</b>	
Fy_placa (Mpa)	248	t_min (mm)	7,31	φRn (N)	199848,47 <b>Cumple</b>
bf_Ancho de columna (mm)	177,8	<b>3. Determinar excentricidad</b>		<b>3. Resistencia del concreto</b>	
d_Largo de columna (mm)	177,8	e (mm)	118,38 <b>Momento grande</b>	φRn (N)	41185,59 <b>No cumple</b> ?
B_Ancho de la placa (mm)	297,8	<b>4. Predimensionamiento de concreto</b>		<b>4. Resistencia al cortante</b>	
N_Largo de la placa (mm)	297,8	Área_min (mm <sup>2</sup> )	795,6	φRn (N)	319757,55 <b>Cumple</b>
Tu_Carga vertical en tensión sufrida (N)	4524	<b>Omitir este paso</b>		<b>5. Deslizamiento crítico</b>	
Pu_Carga vertical en compresión sufrida (N)	146900	fu_min (Mpa)	-2,29	φRn (N)	55572,36 <b>Cumple</b>
Mu_Momento sufrido (N.mm)	17390014,9	fu_máx (Mpa)	5,61	<b>6. Resistencia del concreto</b>	
Vu_Cortante sufrida (N)	13103,541	<b>Omitir este paso</b>		Apoyo de la placa en toda superficie	
<b>Pernos</b>		fu,m (Mpa)	4,02	φPp (N)	1612438,1 <b>Cumple</b>
#_pernos_tensión	2	Mu,m (N.mm/mm)	9137,70	<b>7. Deflexión de la placa</b>	
#_pernos_total	4	<b>Omitir este paso</b>		Espesor de placa def (mm)	
Diámetro_perno (mm)	19,1	tp_min (mm)	14,38 <b>Cumple</b>	Deflexión (mm)	
Planos de corte	1	<b>5. Predimensionar distancia de pernos</b>		25,4	
<b>Ranura</b>		h (mm)	268,02	0,039	
eh_Longitud de Hooke (mm)	61,12	<b>6. Área total de los pernos en tensión</b>			
Fnv_Resistencia_cortante_perno (Mpa)	372	ab (mm <sup>2</sup> )	573,04		
Fu_pernos_tensión (Mpa)	620	<b>7. Determinar dimensión de la placa</b>			
u_Coeficiente fricción estática	0,2	a (mm)	75,26612309		
Tensión de apriete (N)	125000	N_definitivo (mm)	297,8		
<b>Concreto</b>		<b>8. Máximo momento y mínimo espesor</b>			
A1_Área de la placa (mm <sup>2</sup> )	88684,84	Mu (N.mm/mm)	27846		
A2_Área del concreto (mm <sup>2</sup> )	122500	tp_min (mm)	23,927 <b>Cumple</b>		
hg_Espesor del concreto (mm)	50	<b>9. Momento flector debido a la tensión de los pernos</b>			
f'c_Compresión_concreto (Mpa)	28	x (mm)	30,22		
		tp (mm)	22,47		
		<b>Dimensionamiento espesor de la placa</b>			
		tp_min (mm)	23,93		

Ilustración 83: Cálculo de placa base (Autoría propia).



Luego de la verificación del cálculo, la estructura se considera estable y segura para habitar. Los cálculos indican que existe una reducción en carga de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  del peso total de la edificación, esto quiere decir que los elementos soportan una menor carga.

## 7 RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El sistema constructivo que fue planteado, muestra diferentes ventajas de los modelos prefabricados (OSC) y como estos pueden mejorar y sistematizar los modelos constructivos tradicionales. El modelo MPOSS define y recoge las características principales y las ventajas de los modelos actuales constructivos y las reúne por medio de metodologías de eco-sostenibilidad y diseño de ensamble para determinar un nuevo modelo de construcción.

El modelo de construcción MPOSS muestra un sistema 100% desmontable y transportable de acuerdo a sus dimensiones planteadas. Esto favorece las construcciones con dificultad para el ingreso, y beneficia a los modelos de edificación temporal. A pesar que el sistema MPOSS no le fueron realizadas pruebas de rendimiento y tiempo de ensamble, la metodología y el modelo de prefabricación nos muestra que estos sistemas pueden optimizar el tiempo de construcción en un 15 a 20%.

Parte importante del desarrollo de este modelo constructivo radica en diseño de un nuevo sistema liviano de piso y divisiones de fachada, el cual demostró en los análisis de pre-caracterización que puede ser utilizado como sistema de piso flexible y que puede en algún futuro ser utilizado como un sistema de diafragma rígido. Este modelo piso permite disminuir comparativamente el peso de la estructura en un 60 a 75% debido a su baja densidad del compuesto. Adicional este sistema de piso busca utilizar elementos que puedan ser reutilizados y que adicional su esperanza de vida sea mayor de los 50 años.

Los resultados obtenidos por el análisis de elementos finitos muestra una correlación entre la conexión entre los perfiles internos de los módulos de entrepiso del 96% el cual permite constatar que el comportamiento de los elementos podrá ser predecibles al ser simplemente evaluados como un único elemento, esto facilita el

modelo de cálculo al momento de diseñar una edificación. Se debe tener en cuenta que este sistema de conexión debe estar ampliamente utilizada para los distintos casos de carga con el fin de determinar de manera más eficaz el tipo de conexión.

Los resultados teóricos comparativos y los analizados en el modelo de elementos finitos en la unión de la viga perimetral del módulo del entrepiso con la columna receptora presentan una correlación del 96%, lo corrobora que el mejor punto para seccionar los dos grupos se presenta al 22% de la longitud total de la viga debido a que los momentos presentados en esa zona son menores. Este tipo de unión simplemente apoyado, no genera un cambio significativo en la deflexión producida por las cargas vivas y muertas del sistema, representado en una correlación del 98%, lo que permite excluir en el modelo de cálculo la separación virtual entre los dos módulos, teniendo en cuenta un elemento tipo viga de sección uniforme. Sin embargo el cálculo de la unión entre el módulo de entrepiso y el módulo de columna receptora se debe realizar teniendo en cuenta los efectos transitorios (sismos y efecto del viento) y estáticos los cuales debe ser evaluados y dimensionados.

En el proceso de cálculo se establece que a pesar de utilizar un modelo constructivo prefabricado, el modelo de cálculo sigue siendo el proceso convencional; adicional se observa que los perfiles finales de la edificación disminuyeron en casi un 50% respecto a los perfiles comúnmente utilizados para la construcción en acero y esto se debe a que el aligeramiento de la estructura debido al modelo de piso permite que la estructura disminuya sus cargas muertas y a su vez sus cargas inerciales referentes a las fuerzas sísmicas.

## **7.1 MEJORAS REALIZADAS AL PROTOTIPO**

El modelo mostrado en la ilustración 75 realizado en un programa CAD, fue llevado a un modelo de digitalización 3D el cual muestra de una mejor manera las

conexiones, los acabados, las redes, los espacios logrados y se puede apreciar la dimensión espacial. Este modelo computarizado permitió evaluar los detalles internos y evaluar algunos detalles de diseño y de ensamble lo que mejora la calidad y le da una mayor confiabilidad al momento de edificar.



*Ilustración 86: Prototipo digitalizado.*



*Ilustración 87: Terraza de prototipo.*



## 8 CONCLUSIONES

- Los MPOSS son un sistema geoméricamente estandarizado sin ser rívido dimensionalmente; esto permite definir cada uno de los elementos estructurales de acuerdo con las necesidades del proyecto.
- Los MPOSS son sistemas de construcción off-site, es decir, son prefabricados y pre-ensamblados fuera del área de construcción, que al tener tareas repetitivas y procesos más simples permiten un mayor control de cada uno de los grupos y sub-ensambles, dando por consiguiente una mejor calidad, menor reproceso, eficiencia de producción, mayor autonomía de proceso y una disminución del tiempo de construcción (Boyd et al., 2013; Court et al., 2009).
- Los MPOSS permiten una disminución considerable de componentes en obra, debido a que solo entran a participar en el sitio los grupos de sub-ensambles y elementos de unión; esta disminución de componentes en obra, quitando el factor de lesiones por levantamiento de grandes pesos por parte de los trabajadores, disminución del personal en la zona de ensamble y la disminución de los tiempos de ensamble, permite controlar de manera más eficiente la seguridad de los trabajadores destinando menos tareas riesgosas o contraproducentes para la salud (Court et al., 2009).
- Los MPOSS son estructuras que permiten ser desmontadas, transportadas, reutilizadas o recicladas, permiten disminuir la huella de carbono y desperdicio de la edificación, representado en una disminución del impacto ambiental por el proceso de construcción en un 80% (Lara Jaillon & Poon, 2014; Nahmens & Ikuma, 2012; Quale, Eckelman, Williams, Sloditskie, & Zimmerman, 2012).

- Se estima que debido a su diseño y funcionamiento de los MPOSS, la disrupción en el ambiente disminuye proporcionalmente al tiempo ahorrado en la zona de ensamble.
- El sistema de piso presenta un buen comportamiento frente a la flexión tracción, y compresión lo cual lo hace de un elemento que puede llegar a ser utilizado en edificaciones; adicional su rendimiento teórico tanto acústico como térmico da cabida a nuevas investigaciones y corroboraciones.
- El mejor punto para realizar el corte en una estructura se define entonces a 0,2 la longitud de un elemento que se encuentre empotrado empotrado. Esto permite una disminución significativa de las longitudes en caso de requerir ser transportadas, aumentando por consiguiente las distancias permisibles de transporte.
- La unión de los dos perfiles en C mostró un comportamiento coherente con un modelo tipo H de iguales dimensiones bajo cargas controladas y deflexiones controladas; lo anterior permite modelar esta conexión uniforme en un sistema dinámico. Sin embargo se debe evaluar y constatar que la conexión cumpla en relación a las dimensiones, tipo de perno y distancia de conexión.
- Los MPOSS pueden llegar a utilizarse en proyectos de alta demanda como casa de interés social, escuelas rurales, edificaciones de vivienda, oficinas temporales o permanentes, edificaciones para la industria, casas de resguardos o de emergencia e instalaciones militares.
- Los MPOSS permiten tener variaciones de diseño de entrepiso a entrepiso sin afectar su estructura otorgándole una mayor versatilidad y flexibilidad arquitectónicamente; adicional se mejora la calidad de los acabados debido al sistema fabricación controlada Off-Site, lo cual disminuye las posibilidades de

reprocesos y errores de diseño (Lawson, Asce, Ogden, & Bergin, 2012). Con algunas variaciones, se pueden construir instalaciones más complejas y costosas para proyectos especiales

- Este proyecto mostró que se pueden realizar mejoras a los modelos constructivos actuales; utilizando materiales y sistemas constructivos tradicionales pero utilizando diferentes metodologías de diseño. Este proyecto muestra que todavía existe un gran campo para la investigación de nuevos materiales para la construcción.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Boyd, M. M. A. Khalfan, and T. Maqsood, "Off-Site Construction of Apartment Buildings," *J. Archit. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 51–57, Mar. 2013.
- [2] P. F. Court, C. L. Pasquire, G. F. Gibb, and D. Bower, "Modular Assembly with Postponement to Improve Health, Safety, and Productivity in Construction," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 14, no. 2, pp. 81–89, May 2009.
- [3] P. de Colombia, "Con Qué Países Tiene Colombia Tratados De Libre Comercio?," 2012. [Online]. Available: [http://www.productosdecolombia.com/main/guia/TLC\\_Paises\\_Libre\\_Comercio\\_Colombia.asp](http://www.productosdecolombia.com/main/guia/TLC_Paises_Libre_Comercio_Colombia.asp).
- [4] M. L. Ramirez, "El Futuro de la Ciencia y la Tecnología en Colombia," 2008. [Online]. Available: [www.colombiaaprende.edu.co/html/.../articles-157195\\_recurso\\_4.ppt](http://www.colombiaaprende.edu.co/html/.../articles-157195_recurso_4.ppt).
- [5] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, S. X. Zeng, and W. C. Y. Ng, "Towards adoption of prefabrication in construction," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 10, pp. 3642–3654, 2007.
- [6] L. Jaillon and C. S. Poon, "Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong," *Autom. Constr.*, vol. 39, pp. 195–202, Apr. 2014.
- [7] I. Nahmens and L. H. Ikuma, "Effects of Lean Construction on Sustainability of Modular Homebuilding," *J. Archit. Eng.*, vol. 18, no. June, pp. 155–163, 2012.

- [8] S. Arce Manrique, "Identificación de los principales problemas en la logística de abastecimiento de las empresas constructoras Bogotanas y propuesta de mejoras," Pontificia Universidad Javeriana, 2009.
- [9] A. F. a B. H. Kong, "An impending waste crisis!," 2021. [Online]. Available: <http://www.abhk.org/an-impending-waste-crisis/>.
- [10] L. Jaillon and C. S. Poon, "The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector," *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 3, pp. 239–248, 2009.
- [11] N. Blismas, C. Pasquire, and A. Gibb, "Benefit evaluation for off-site production in construction," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 24, no. 2, pp. 121–130, Feb. 2006.
- [12] P. Martínez, V. González, E. Da Fonseca, and U. De Valparaíso, "Integración conceptual Green-Lean en el diseño , planificación y construcción de proyectos Green-Lean conceptual integration in the project design , planning and construction," vol. 24, pp. 5–32, 2009.
- [13] G. Ovando-Vacarezza, B. Lauret-Aguirregabiria, J. M. Lirola-Pérez, and E. Castañeda-Vergara, "Technical Evolution of 3D Modular Construction from the Nineteenth Century to World War II," in *Construction and Building Research SE - 16*, C. Linares-Millán, I. Fernández-Plazaola, F. Hidalgo-Delgado, M. M. Martínez-Valenzuela, F. J. Medina-Ramón, I. Oliver-Faubel, I. Rodríguez-Abad, A. Salandin, R. Sánchez-Grandia, and I. Tort-Ausina, Eds. Springer Netherlands, 2014, pp. 115–121.
- [14] S. Archives, "Historic Homes," *Mar 21*, 2012. [Online]. Available: [www.searsarchives.com/homes/index.htm](http://www.searsarchives.com/homes/index.htm).

- [15] L. A. D. G. VOISIN, "Maison en trois Jours," 2014. [Online]. Available: [http://www.avions-voisin.org/public/rubrique.php3?id\\_rubrique=14](http://www.avions-voisin.org/public/rubrique.php3?id_rubrique=14).
- [16] R. Awad Rochel, "*Análisis de Estructuras Indeterminadas Programa en Basic del Método de Kani*," Editorial. Medellín-Colombia, 1986, pp. 1–97.
- [17] G. Kani, *Cálculo de Pórticos de Varios Pisos*, EDITORIAL. España, 1981, pp. 1–90.
- [18] J. C. McCormac, *Análisis de Estructuras, Métodos Clásicos y Matricial*, ALFAOMEGA. Mexico D.F, 2010, pp. 3 – 531.
- [19] R. Awad Rochel, *Análisis Matricial de Estructuras*. Medellín, 1993.
- [20] J. Ambrose, *Simplified Design of Building Structures*, Jhon Wiley. United States of America, 1976, pp. 133–238.
- [21] B. Bresler, T. Y. Lin, and J. B. Scalzi, *Diseño de Estructuras de Acero*, LIMUSA-WIL. Mexico D.F, 1973.
- [22] M. Piralla, *Diseño Estructural*, LIMUSA NOR. Mexico D.F, 1993, pp. 1– 250.
- [23] H. M. Priest and J. A. Gilligan, *Design Manual for High Strength Steels*, United Sta. United States of America, 1959, pp. 1– 168.
- [24] A. Ramos Lopez, *La Construcción Metálica*. Madrid, 1965.
- [25] C. G. Salmon, J. Johnson, and F. Malhas, *Steel Structures*. United States of America, 2009.
- [26] S. W. Crawley and R. M. Dillon, *Steel Building*, Jhon Wiley. Utah, 1993.

- [27] P. Jodido, *Green Architecture Now!*, Taschen. New York, 2010.
- [28] A. C. de I. Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogota D.C. - Colombia, p. Tomo 1 y Tomo 3.
- [29] C. Aguirre Ahumada, *Especificaciones ANSI/AISC 360-10 para construcciones en acero*, Asociación. Santiago de Chile: 2010, 2010.
- [30] A. Aghayere and J. Vigil, *Structural Steel Design*. 2009.
- [31] R. Awad Rochel, *Análisis y diseño sísmico de edificios*, Fondo Edit. Medellín-Colombia: 2012, 2012, pp. 25–382.
- [32] A. Bahamón and M. C. Sanjinés, *Rematerial from Waste to Architecture*, W.W. Norto. Barcelona, 2010.
- [33] V. Ballard Bell and P. Rank, *Materials for Design*, Monarka. New York, 2014.
- [34] O. Bezgin, “An architectural vision realized through prefabrication,” *PCI J.*, vol. 58, no. 1, pp. 63–77, 2013.
- [35] J. U. Escamilla, *Análisis de Estructuras*, ECOE edici. Bogota D.C. - Colombia, 1993, pp. 1–662.
- [36] L. García Reyes, *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogota D.C. - Colombia, 1998.
- [37] A. C. de I. Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. 2010.

- [38] William T. Segui, *Diseño de Estructuras de Acero con LRFD*, Thomson Ed. Mexico D.F, 2000.